



TESIS - TM 142501

**STUDI KARAKTERISTIK ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL)
METODE PELAMPUNG DENGAN VARIASI DIMENSI PELAMPUNG
DAN PANJANG LENGAN**

**I Made Susanto
NRP. 2113 205 007**

**Dosen Pembimbing:
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN DESAIN SISTEM MEKANIKAL
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



THESIS - TM 142501

**STUDY CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL ENERGY
GENERATED SEA WAVE POWER PLANT (PLTGL) FLOAT
METHOD WITH A FLOAT-DIMENSIONAL VARIATION AND LONG
SLEEVE**

**I Made Susanto
NRP. 2113 205 007**

**Supervisor:
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.**

**MASTER PROGRAMME
FIELD STUDY OF DESIGN OF MECHANICAL SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015**

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

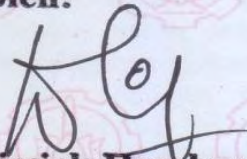
I MADE SUSANTO

Nrp. 211 320 5007

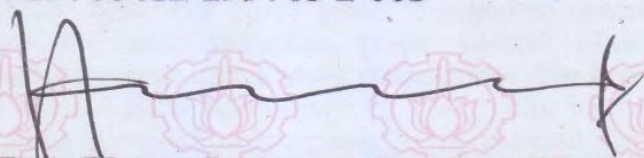
Tanggal Ujian: 30 Nopember 2015

Periode Wisuda: Maret 2016

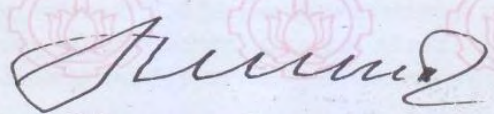
Disetujui oleh:

1. 
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.
NIP. 19700412 199703 2 003

(Pembimbing)

2. 
Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.
NIP. 19750511 199903 1 001

(Penguji)

3. 
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc., Ph.D.
NIP. 19510605 197803 1 002

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,




Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D

NIP. 19601202 198701 1 001

STUDI KARAKTERISTIK ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL) METODE PELAMPUNG DENGAN VARIASI DIMENSI PELAMPUNG DAN PANJANG LENGAN

Nama Mahasiswa : I Made Susanto
NRP : 2113205007
Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Peningkatan aktivitas menyebabkan kebutuhan energi listrik yang meningkat pula. Sedangkan ketersediaan energi fosil yang semakin menipis, maka banyak penelitian dilakukan untuk mencari energi alternatif. Sumber energi yang belum dimanfaatkan secara maksimal salah satunya adalah energi gelombang laut. Maka dari itu, pada penelitian ini dibahas tentang simulasi dan eksperimen model pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan metode pelampung silinder. Gelombang yang dihasilkan simulator gelombang akan menggerakkan pelampung naik turun dan memutar serangkaian gear dan generator. Besarnya gaya buoyancy yang mengangkat pelampung silinder tergantung dari panjang pelampung silinder. Selain itu panjang lengan juga menentukan besarnya torsi yang digunakan untuk memutar gearbox dan generator. Penelitian ini dititikberatkan pada variasi dimensi pelampung dan lengan untuk mendapatkan energi listrik yang maksimum dan kontinyu.

Variasi pada komponen PLTGL yaitu variasi dimensi lengan 50 cm, 45 cm dan 30 cm serta dimensi pelampung yaitu sebesar 30 cm, 28 cm dan 25 cm dan variasi frekuensi. Hasil eksperimen terbesar diperoleh pada panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 30 cm dengan frekuensi 3 Hz energi yang dihasilkan sebesar 0.2889 volt dan 0.014503 watt. sedangkan besarnya error rata-rata yang terjadi pada simulasi terhadap eksperimen sebesar 5.4 % dengan efisiensi mekanis rata-rata sebesar 9.079 %, sedangkan jika dipasang dilaut bebas dengan skala 1:17 maka diperoleh panjang lengan 5.1 m dan panjang pelampung 5.1 m dengan energi yang dihasilkan sebesar 129.97 watt.

Kata kunci : dimensi lengan, dimensi pelampung silinder, energi listrik, gelombang laut, PLTGL metode pelampung silinder.

STUDY CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL ENERGY GENERATED SEA WAVE POWER PLANT (PLTGL) FLOAT METHOD WITH A FLOAT-DIMENSIONAL VARIATION AND LONG SLEEVE

Student Name : I Made Susanto
Student Identity Number : 2113205007
Supervisor : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRACT

Increased activity causes the electric energy needs are increasing as well. While the availability of fossil energy are dwindling, so a lot of research done to find alternative energy. An energy source that has not been fully utilized one of which is the energy of ocean waves. Therefore, in this study discussed about the simulation and experimental models of sea wave power plant with a cylindrical float method. Waves generated in the wave simulator will move the float up and down and rotate a series of gear and generator. The magnitude of the buoyancy force lift cylinder float depending on the length of cylindrical buoys. Besides the long arm also determine the amount of torque that is used to rotate the gearbox and generator. This study focused on the variation of the dimensions of the buoy and the arm to get the maximum electric energy and continuous.

Variations on PLTGL component that arm dimensional variations of 50 cm, 45 cm and 30 cm as well as the dimensions of the buoy that is equal to 30 cm, 28 cm and 25 cm and frequency variation. Most experimental results obtained in arm length of 30 cm and float length of 30 cm with a frequency of 3 Hz the energy produced amounted to 0.2889 volt and 0.014503 watt. While the magnitude of the average error that occurs in a simulation of the experiments amounted to 5.4% with mechanical efficiency by an average of 9.079%, whereas if it is installed on the high seas with the scale 1:17 then obtained a long sleeve 5.1 m and long buoy 5.1 m with the energy produced amounted to 129.97 watt.

Keywords : arm dimensions, dimensional cylindrical buoys, electrical energy, sea wave, PLTGL method cylindrical buoys.

KATA PENGANTAR

Puji syukur selalu saya panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala limpahan anugerah-Nya yang tiada henti sehingga tesis yang berjudul **”Studi Karakteristik Energi Listrik yang Dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Metode Pelampung dengan Variasi Dimensi Pelampung dan Panjang Lengan”** dapat terselesaikan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di FTI-ITS Surabaya.

Selama proses penelitian berlangsung sampai dengan terselesaikannya penulisan tesis ini, penulis menyampaikan terima kasih tak terhingga kepada:

1. Kedua orang tua dan kakakku yang selalu memberikan do’a dan motivasinya untukku dalam menyelesaikan studi ini.
2. DIKTI selaku penyelenggara beasiswa Pra S2 Saintek dan BPPDN yang telah memberikan saya kesempatan untuk studi lanjut di pascasarjana ITS.
3. Kaprodi S2 Teknik Mesin FTI-ITS, Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
4. Pembimbing saya, Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT, yang telah memberikan arahan dan selalu menyumbangkan pemikirannya dalam penyelesaian tesis ini.
5. Penguji saya, Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng dan Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D, yang telah memberikan saran, arahan dan masukan dalam menyelesaikan tesis ini.
6. Bapak/Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin ITS yang sudah menyumbangkan ilmunya dan segenap civitas akademika yang sudah banyak membantu.
7. Seluruh teman seperjuangan S2 Teknik Mesin ITS.
8. Pihak-pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Dengan harapan semoga tesis ini dapat memberikan kontribusi bagi penelitian-penelitian terkait. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Hal ini karena keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis, sehingga diharapkan kritik maupun saran yang membangun sebagai perbaikan.

Surabaya, Desember 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Teori Penunjang	13
2.2.1 Teori Gelombang Laut	13
2.2.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut	17
2.2.3 Gaya Apung (Bouyancy Force)	20
2.2.4 Gaya Generated	21
2.3 Roda Gigi (Gearbox)	22
2.3.1 Roda Gigi Secara Umum	22
2.3.2 Ratio Gigi	23
2.3.3 Momen Torsi	24
2.3.4 Momen Inersia	24
2.3.5 Konstanta Kekakuan Torsi Poros	25

2.3.6 Konstanta Damping Torsi	25
2.4 Teori Mekanika Getaran	25
2.5 Generator	26
2.6 Analisa Pada Mekanisme	29
2.6.1 Keseimbangan Statis	29
2.6.2 Keseimbangan Dinamis	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Studi Literatur	33
3.2 Identifikasi masalah	34
3.3 Desain Konsep Mekanisme PLTGL Metode Pelampung Silinder	35
3.3.1 Simulasi Karakteristik Model PLTGL	37
3.3.2 Rancang Bangun Mekanisme PLTGL	39
3.3.3 Pengujian Eksperimen Karakteristik PLTGL	43
3.3.4 Validasi Hasil Eksperimen dengan Hasil Pemodelan	45
3.3.5 Efisiensi Sistem PLTGL	46
3.3.6 Analisa Hasil	47
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Pemodelan Matematis PLTGL dengan Pelampung Silinder	49
4.1.1 Pemodelan Matematis pada PLTGL	49
4.1.2 Persamaan Gerak Mekanisme Gearbox	51
4.1.3 Persamaan Gerak Rotary Generator	51
4.1.4 Parameter Hasil Desain PLTGL	52
4.2 Pemodelan pada Simulink Matlab	54
4.2.1 Pemodelan inputan gelombang laut	54
4.2.2 Pemodelan Time Respon PLTGL	55
4.3 Hasil Simulasi dan Analisa Berupa Energi Bangkitan	56
4.3.1 Energi yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung pada frekuensi 1 Hz	56
4.3.2 Energi yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung pada frekuensi 2 Hz	59

4.3.3 Energi yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung pada frekuensi 3 Hz	61
4.3.4 Analisa daya yang hasil simulasi pengaruh frekuensi dan panjang pelampung terhadap energi yang dihasilkan	64
4.4 Pengujian Dinamis Mekanisme PLTGL Tipe Pelampung silinder.....	68
4.5 Hasil dan Analisa Hasil pengujian	69
4.5.1 Energi yang Dihasilkan PLTGL Tipe Pelampung Silinder	69
4.5.2 Frekuensi 1 Hz pada panjang lengan 50 cm	71
4.5.3 Pengujian dengan frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 45 cm	71
4.5.4 Pengujian dengan frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 30 cm	72
4.5.5 Hasil eksperimen frekuensi 2 Hz pada panjang lengan 50 cm	73
4.5.6 Pengujian dengan frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 45 cm	74
4.5.7 Pengujian dengan frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 30 cm	75
4.5.8 Hasil eksperimen pada frekuensi 3 Hz pada panjang lengan 50 cm ..	76
4.5.9 Pengujian dengan frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 45 cm	77
4.5.10 Pengujian dengan frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 30 cm	78
4.5.11 Pengaruh frekuensi dan panjang lengan terhadap Energi Bangkitan.	79
4.6 Error Hasil Simulasi Terhadap Hasil Eksperimen	83
4.6.1 Frekuensi 1 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm	83
4.6.2 Frekuensi 2 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm	84
4.6.3 Frekuensi 3 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm	85
4.7 Efisiensi PLTGL Dalam Menghasilkan Energi	88
4.8 Validasi Hasil Simulasi Terhadap Hasil Eksperimen	89
4.8.1 Frekuensi 1 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm	89
4.8.2 Frekuensi 2 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm	91
4.8.3 Frekuensi 3 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm	92
4.9 Skala Mekanisme	93

BAB 5 PENUTUP	95
5.1 Kesimpulan	95
5.2 Saran-Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIOGRAFI	

DAFTAR GAMBAR

Nama Gambar	Hal
Gambar 2.1 Konverter Gelombang Laut Menggunakan <i>One-Way Gear</i>	6
Gambar 2.2 Model Energi <i>Converter</i>	7
Gambar 2.3 Grafik Pengaruh Panjang Lengan Terhadap Daya	7
Gambar 2.4 Ilustrasi Tenaga Ombak Dari Konverter Energi Gelombang	8
Gambar 2.5 Sketsa Buoy, Tali, dan Linier Generator	9
Gambar 2.6 Linear Magnetic Gears	10
Gambar 2.7 PLTGL oleh Wave Star Energy	10
Gambar 2.8 Sistem Mekanik Drive-Train Skala Lab	11
Gambar 2.9 Grafik Pengaruh Torsi Terhadap Energi yang Dihasilkan	12
Gambar 2.10 Magnet Linear Buoy	13
Gambar 2.11 Pergerakan Air Laut	13
Gambar 2.12 Proses Pembentukan Gelombang Akibat Angin	14
Gambar 2.13 Sketsa Gelombang Laut	15
Gambar 2.14 Karakteristik Gelombang Laut Linear	16
Gambar 2.15 Karakteristik Gelombang Laut Non Linear	17
Gambar 2.16 Karakteristik Gelombang	18
Gambar 2.17 (a) Benda Terapung, (b) Benda Melayang	20
Gambar 2.18 Analisa Gaya Yang Dihasilkan Pelampung	21
Gambar 2.19 Gaya-Gaya yang Bekerja Pada Pelampung	21
Gambar 2.20 Bagian Roda Gigi	23
Gambar 2.21 Perbandingan Rasio Roda Gigi	23
Gambar 2.22 Torsi yang Bekerja Pada Poros Utama	24
Gambar 2.23 GGL Induksi Terjadi pada a-b dan c-d Yang Berputar	27
Gambar 2.24 Skema Generator Listrik	28
Gambar 2.25 Keseimbangan Statis Pada Sebuah Poros	30
Gambar 2.26 Free Body Diagram Pada Keseimbangan Statis	30
Gambar 2.27 Mekanisme Sistem Dinamis Pada Lengan	31
Gambar 2.28 Free Body Diagram Pada Lengan Dan Pelampung	32

Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 3.2 Desain Konsep PLTGL Dengan Rotary Generator	35
Gambar 3.3 Pandangan Samping Skema Mekanisme PLTGL	35
Gambar 3.4 Pelampung Bergerak Keatas	36
Gambar 3.5 Pelampung Bergerak Kebawah	37
Gambar 3.6 Diagram Alir Karakteristik Model PLTGL	38
Gambar 3.7 Diagram Alir Perancangan PLTGL	40
Gambar 3.8 Pelampung	41
Gambar 3.9 Lengan Pelampung	41
Gambar 3.10 Roda Gigi	42
Gambar 3.11 Bearing Satu Arah	42
Gambar 3.12 Generator DC	43
Gambar 3.13 Diagram Alir Pengujian Karakteristik PLTGL	43
Gambar 3.14 Kolam Pengujian	44
Gambar 3.15 Rancangan Mekanisme PLTGL Tipe Pelampung Silinder	44
Gambar 3.16 Digital Storage Oscilloscope	45
Gambar 3.17 Diagram Alir Validasi	45
Gambar 4. 1 Model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut	49
Gambar 4.2 Model Lengan pengungkit PLTGL	49
Gambar 4.3 Free body Lengan pengungkit PLTGL	50
Gambar 4.4 Mekanisme Gearbox	51
Gambar 4.5 FBD Mekanik Generator	51
Gambar 4.6 FBD Elektri Generator	52
Gambar 4.7 Grafik eksitasi yang diberikan berupa sinusoidal	54
Gambar 4.8 Grafik daya gelombang pada kolam simulator	55
Gambar 4.9 Block simulasi pada matlab	56
Gambar 4.10 Grafik respon pada Pl 50 cm terhadap variasi pelampung	57
Gambar 4.11 Grafik respon pada Pl 45 cm terhadap variasi pelampung	57
Gambar 4.12 Grafik respon pada Pl 30 cm terhadap variasi pelampung	58
Gambar 4.13 Grafik respon pada Pl 50 cm terhadap variasi pelampung	59
Gambar 4.14 Grafik respon pada Pl 45 cm terhadap variasi pelampung	60
Gambar 4.15 Grafik respon pada Pl 30 cm terhadap variasi pelampung	60

Gambar 4.16 Grafik energi pada Pl 50 cm terhadap variasi pelampung	62
Gambar 4.17 Grafik energi pada Pl 45 cm terhadap variasi pelampung	62
Gambar 4.18 Grafik energi pada Pl 30 cm terhadap variasi pelampung	63
Gambar 4.19 hubungan frekuensi dan panjang lengan 50 cm	64
Gambar 4.20 hubungan frekuensi dan panjang lengan 45 cm	66
Gambar 4.21 hubungan frekuensi dan panjang lengan 30 cm	67
Gambar 4.22 Mekanisme PLTGL sistem pelampung silinder	68
Gambar 4.23 Mekanisme PLTGL saat pengujian	69
Gambar 4.24 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz , PL 50 ...	71
Gambar 4.25 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, PL 45	72
Gambar 4.26 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, PL 30	73
Gambar 4.27 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, PL 50 ...	74
Gambar 4.28 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, PL 45	75
Gambar 4.29 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, PL 30	76
Gambar 4.30 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, PL 50	77
Gambar 4.31 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, PL 45	78
Gambar 4.32 Energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, PL 30 ...	79
Gambar 4.33 Grafik PL 50 cm dengan variasi panjang pelampung	80
Gambar 4.34 Grafik PL 45 cm dengan variasi panjang pelampung	81
Gambar 4.35 Grafik PL 30 cm dengan variasi panjang pelampung	82
Gambar 4.36 Grafik error simulasi dan eksperimen pada frekuensi 1 Hz	84
Gambar 4.37 Grafik error simulasi dan eksperimen pada frekuensi 2 Hz	85
Gambar 4.38 Grafik error simulasi dan eksperimen pada frekuensi 3 Hz	86
Gambar 4.39 Grafik validasi pada frekuensi 1 Hz	90
Gambar 4.40 Grafik validasi pada frekuensi 2 Hz	91
Gambar 4.41 Grafik validasi pada frekuensi 3 Hz	93

DAFTAR TABEL

Nama Tabel	Hal
Tabel 3.1 Parameter Komponen PLTGL	34
Tabel 3.2 Spesifikasi motor DC	42
Tabel 4.1 Data parameter gelombang pada kolam simulator	52
Tabel 4.2 Perhitungan kekakuan poros	52
Tabel 4.3 Perhitungan Momen inersia	53
Tabel 4.4 Parameter sistem Mekanisme PLTGL	53
Tabel 4.5 Hasil simulasi pada frekuensi 1 Hz	58
Tabel 4.6 Hasil simulasi pada frekuensi 2 Hz	61
Tabel 4.7 Hasil simulasi pada frekuensi 3 Hz	63
Tabel 4.8 Hasil simulasi pada panjang lengan 50 cm	65
Tabel 4.9 Hasil simulasi pada panjang lengan 45 cm	66
Tabel 4.10 Hasil simulasi pada panjang lengan 30 cm	67
Tabel 4.11 Hasil pengujian energi bangkitan PLTGL tipe silinder	69
Tabel 4.12 Hasil eksperimen pada panjang lengan 50 cm	80
Tabel 4.13 Hasil eksperimen pada panjang lengan 45 cm	81
Tabel 4.14 Hasil eksperimen pada panjang lengan 30 cm	83
Tabel 4.15 Persentase error pada hasil simulasi dan hasil eksperimen	87
Tabel 4.16 Hasil perhitungan efisiensi mekanis pada PLTGL	89
Tabel 4.17 Tabel Skala Mekanisme	90

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi bagi kehidupan manusia adalah hal yang sangat penting. Segala sesuatu yang menunjang keperluan hidup tergantung pada jumlah ketersediaan energi. Seiring kemajuan zaman, manusia lebih banyak membutuhkan energi yang dapat dimanfaatkan. Berbagai macam cara pemanfaatan energi telah dilakukan baik dengan cara modern maupun tradisional. Prinsip dari pemanfaatan energi adalah dengan cara mengubah energi ke dalam bentuk energi lain. Terdapat dua buah energi yaitu energi terbarukan dan energi tidak terbarukan. Untuk energi terbarukan tidak menemui banyak kendala dalam hal ketersediaannya, namun untuk energi tidak terbarukan memiliki masalah terkait ketersediaannya. Energi tak terbarukan seperti yang dihasilkan dari material di bawah bumi semakin lama semakin berkurang, sehingga harus ada pemanfaatan energi lain untuk menggantikannya. Salah satu energi yang tersedia cukup melimpah di Indonesia adalah panas bumi dan energi gelombang laut.

Gelombang merupakan sumber energi yang cukup besar, gelombang merupakan gerakan air laut yang turun-naik atau bergulung-gulung. Energi gelombang laut adalah energi alternatif yang dibangkitkan melalui efek gerakan tekanan udara akibat fluktuasi pergerakan gelombang. Pemanfaatan energi gelombang laut untuk dijadikan energi listrik dengan menggunakan pembangkit listrik mikrohidro. Jenis pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini selain ramah lingkungan, dalam pembangunan dan pengoperasiannya tidak akan merusak ekosistem alam. Salah satu potensi laut dan samudra yang belum banyak diketahui masyarakat umum adalah potensi energi gelombang laut untuk menghasilkan energi listrik.

Merujuk pada undang-undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, mengamanatkan bahwa dalam rangka mendukung pembangunan nasional secara berkelanjutan dan meningkatkan ketahanan energi nasional, maka pengelolaan energi ditunjukkan untuk tercapainya kemandirian pengelolaan energi,

terjaminnya ketersediaan energi dalam negeri, terjaminnya pengelolaan sumber daya energi secara optimal, terpadu, dan berkelanjutan, tercapainya peningkatan akses masyarakat, tercapainya pengembangan kemampuan industri energi dan jasa energi dalam negeri, meningkatnya profesionalisme sumber daya manusia, terciptanya lapangan kerja, dan terjaganya kelestarian fungsi lingkungan hidup.

Pada penelitian Mats Leijon et al., 2004 [1] dinyatakan bahwa permintaan energi listrik diperkirakan meningkat dan diperlukan untuk menemukan metode dalam mengekstrak energi listrik dari sumber energi terbarukan seperti gelombang laut. Potensi energi gelombang laut di Uni Eropa telah diperkirakan secara konservatif sebesar 120-190 TWh / tahun pada lepas pantai dan tambahan 34-46 TWh / tahun pada lokasi dekat pantai.

Sedangkan pada penelitian Safwan Hadi, 2014 [2] yang membahas tentang laut Indonesia didapatkan bahwa Indonesia memiliki arus dan gelombang laut yang sangat potensial untuk menghasilkan energi listrik. Potensi ini tersebar di berbagai daerah diantaranya bagian selatan Jawa dan bagian barat Sumatera karena memiliki gelombang yang cukup besar. Potensi energi yang dihasilkan di pantai Indonesia memiliki nilai rapat daya yang cukup besar, yaitu berkisar antara 0.06 kW per meter kubik sampai 64 kW per meter kubik.

Pemanfaatan energi gelombang laut sebagai pembangkit tenaga listrik memang belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengkaji tentang pemanfaatan gelombang laut sebagai pembangkit listrik dengan memanfaatkan prinsip GGL induksi yang dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan metode pelampung. Besar GGL induksi dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu jumlah lilitan, kuat medan magnet, dan kecepatan gerak magnet. Sedangkan untuk sistem pembangkit listrik, yang mempengaruhi besar GGL induksi diantaranya terletak pada bentuk pelampung, panjang lengan, massa pelampung dan cepatnya putaran pada transmisi. Fungsi gaya inputan memanfaatkan gaya angkat dari gelombang dan gaya apung dari pelampung. Sedangkan pada kasus pembangkit listrik tenaga gelombang laut, gaya apung dan gaya angkat dari gelombang laut sangat dipengaruhi oleh massa pelampung dan massa dari batang penggeraknya. Pada saat pergerakan turun secara riilnya dapat

dimanfaatkan sebagai penggerak generator dengan memanfaatkan gaya berat batang dan gaya berat pelampung.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, maka pada penelitian ini dilakukan analisa, simulasi dan validasi terhadap hasil eksperimen tentang perubahan GGL induksi yang dihasilkan oleh *rotary generator* dengan memvariasikan panjang lengan pengungkit, panjang pelampung dan massa pelampung. Sehingga perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana memodelkan dan mensimulasikan model mekanisme PLTGL dengan metode pelampung?
2. Bagaimana merancang dan membuat mekanisme PLTGL metode pelampung silinder untuk skala laboratorium?
3. Bagaimana menganalisis hubungan antara energi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan dengan memvariasi panjang lengan, panjang pelampung dan massa pelampung?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian berdasarkan perumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan dan mensimulasikan karakteristik mekanisme PLTGL yang mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik (dalam volt) dengan efisiensi yang tinggi dalam skala laboratorium.
2. Merancang dan membuat mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder dengan prinsip GGL Induksi pada *rotary generator* yang mampu bergerak akibat gelombang laut.
3. Melakukan analisis tentang hubungan antara energi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan dengan memvariasi panjang lengan, panjang pelampung dan massa pelampung.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan mekanisme PLTGL metode pelampung.
2. Alat konversi energi gelombang laut menjadi energi listrik yang akan dibuat hanya digunakan untuk skala laboratorium.
3. Gelombang air laut yang digunakan akan disimulasikan oleh mekanisme pembuat gelombang pada kolam simulator dan dianggap sempurna.
4. Gerakan pelampung dianggap satu derajat kebebasan (vertikal).
5. Nilai *damping* yang diakibatkan oleh gaya gesek pada *bearing* diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan maka didapatkan manfaat sebagaimana berikut ini:

1. Dapat memberikan data-data karakteristik tentang gelombang laut dan energi listrik yang dapat dihasilkan.
2. Dapat menjadi dasar untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan energi gelombang laut.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

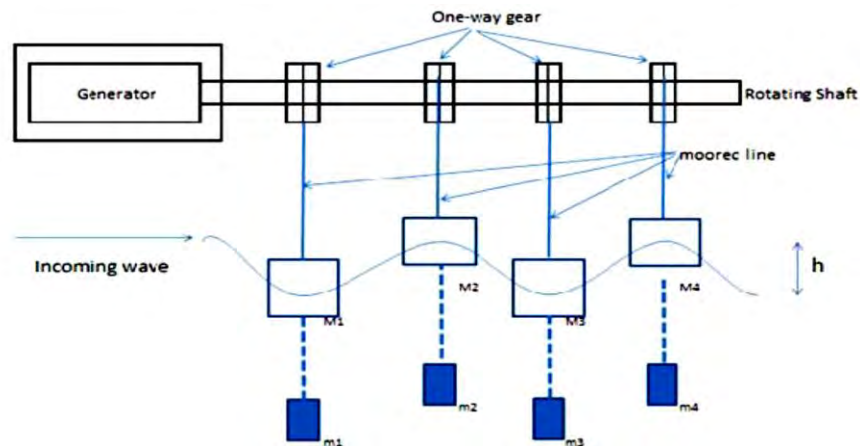
2.1 Penelitian Terdahulu

Begitu banyak penelitian tentang pembangkit listrik tenaga gelombang air laut (PLTGL). Berbagai jenis PLTGL telah dikembangkan, dari skala laboratorium sampai skala eksperimen langsung dilaut lepas. Pada dasarnya semua itu dilakukan guna mencari energi alternative yang bisa terbarukan (*renewable energy*) dan ramah lingkungan. Semua itu disebabkan semakin menipisnya pasokan energi yang berasal dari dasar bumi, seperti minyak bumi dan bahan tambang lainnya serta begitu besarnya emisi yang disebabkan oleh pembangkit yang menggunakan bahan bakar sehingga dapat bermasalah buat kesehatan makhluk hidup.

Berbagai macam pembangkit listrik yang telah dilakukan seperti pembangkit listrik tenaga angin yang ditemukan banyak orang mengakibatkan perubahan jalur sistem migrasi para burung, kelelawar dan beberapa hewan lainnya. Dari beberapa penelitian tersebut pembangkit listrik terbarukan yang ramah lingkungan adalah pembangkit listrik tenaga gelombang air laut. Dimana pembangkit ini tidak membawa pengaruh terhadap biota laut. Dari kelebihan tersebut ada beberapa kekurangan dari sistem pembangkit gelombang laut tersebut diantaranya memerlukan biaya yang cukup besar dan energi yang dihasilkan sangat bervariasi yang diakibatkan perubahan angin setiap bulannya tidak tetap.

Penelitian yang pernah dilakukan mengenai potensi gelombang laut, yaitu salah satunya dilakukan oleh Masjono, 2002 [3] tentang perancangan alat konverter energi gelombang laut yang dilakukan dengan memanfaatkan roda gigi satu arah (*oneway gear*) terdiri atas rotor *shaft*, *one-way gear*, alat pemberat yang dapat terapung, *counter weight* yang berfungsi untuk menjaga ketegangan tali penggantung saat terjadi osilasi. Konsep dari penelitian tersebut adalah beberapa perangkat mengapung tertambat disatukan menggunakan rantai pada roda gigi satu arah yang dikombinasikan dengan massa bergerak untuk menahan rantai

tetap lurus. Perangkat ini akan mengubah energi ketika gelombang laut yang datang dan menghantarkannya ke generator listrik melalui poros satu arah.

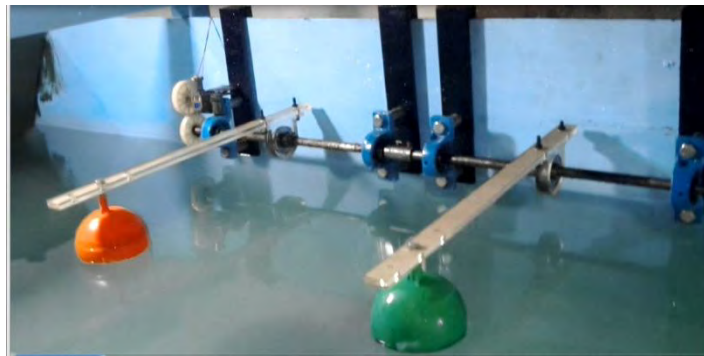


Gambar 2.1 Ilustrasi Konverter Gelombang Laut Menggunakan *One-Way Gear* [3].

Untuk mengoperasikan konverter ini harus dipasang searah dengan gelombang laut sehingga pelampung yang pertama bekerja adalah M_1 dan m_1 , lalu diikuti oleh pelampung berikutnya. Pada Gambar 2.1 menunjukkan tampak samping masing-masing pelampung dan *counter weight* serta gaya yang bekerja pada setiap pelampungnya.

Dari simulasi yang dibuat menunjukkan bahwa perubahan tinggi gelombang berpengaruh sangat signifikan terhadap energi yang dihasilkan. Tapi pada penelitian ini, pemanfaatan gelombang dilakukan pada saat pelampung naik keatas, sedangkan pada saat pelampung bergerak turun sistem tidak bekerja karena adanya *one way bearing*.

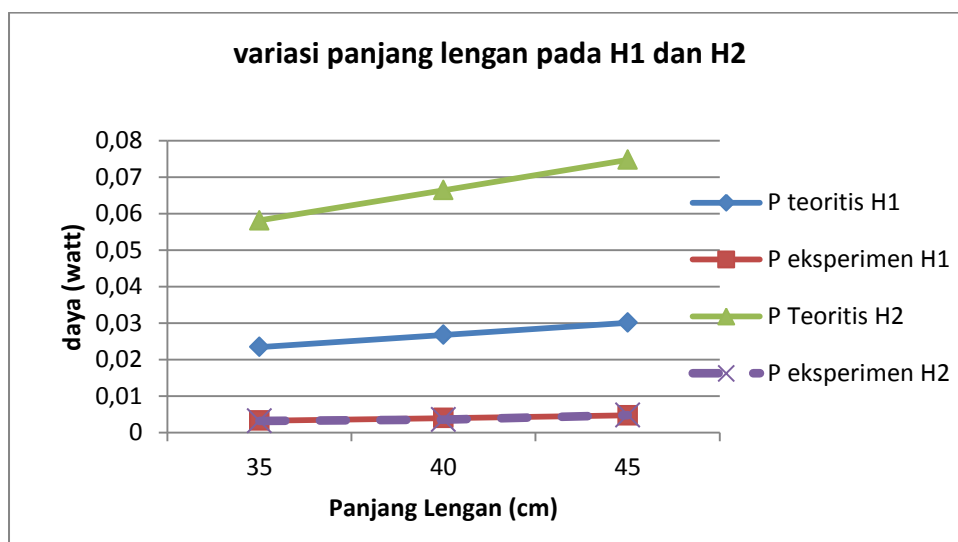
Yulyana, 2014 [4] menyatakan bahwa tipe dari alat pemanen ini menggunakan pelampung sebagai inputan tenaga dari gelombang air. Alat ini dikembangkan dalam skala laboratorium dimana saat pengujian alat tersebut diletakkan dalam kolam air khusus pengujian. Gelombang air dibuat dengan mekanisme pembuat gelombang air laut yang dapat diatur amplitude dan frekuensinya sehingga sesuai kebutuhan pengujian.



Gambar 2.2 Model Energi *Converter* [4]

Prinsip kerja alat ini memanfaatkan turunnya gelombang laut. Pada saat gelombang bergerak turun, bearing satu arah akan mengunci yang menyebabkan poros berputar dan pada saat air bergerak naik maka pelampung ikut naik dan menggerakkan lengan akan tetapi bearing satu arah dalam keadaan bebas atau tidak terkunci sehingga poros tidak ikut bergerak.

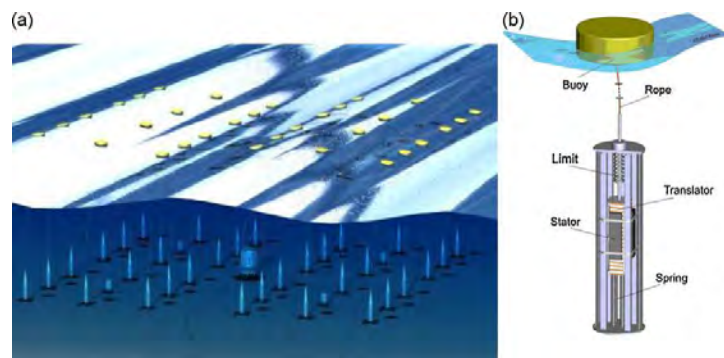
Dalam percobaan ini, gerakan gelombang laut disimulasikan dengan amplitudo dan frekuensi gelombang tertentu pada kolam berukuran 4,5 m x 1 m x 0.7 m. Adapun grafik hubungan panjang lengan terhadap energi yang dihasilkan seperti pada Gambar 2.3. Ada beberapa kelemahan dari penelitian ini, yaitu pada saat pelampung dikenai gaya dari gelombang tidak dimanfaatkan untuk memutar generator, hanya memanfaatkan massa pelampung dan massa lengan, maka energi yang dihasilkan tidak kontinyu.



Gambar 2.3 Grafik Pengaruh Panjang Lengan Terhadap Daya [4].

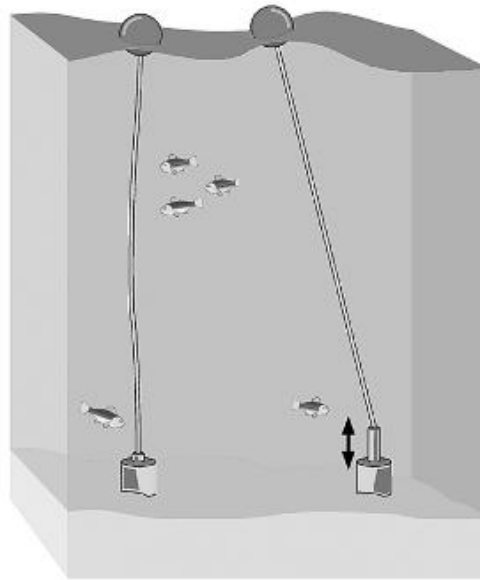
Hasil yang di peroleh setelah melakukan eksperimen, menunjukkan bahwa semakin panjang lengan dan semakin tinggi gelombang (H_1 dan H_2) maka, energi yang dihasilkan semakin besar.

Olivia Langhamer et al., 2010 [5] membahas energi listrik dari gelombang laut yang diprediksi menjadi sumber baru hasil konversi energi terbarukan yang dapat berkembang secara signifikan dan memberikan potensi yang besar. Pada penelitiannya energi dibangkitkan menggunakan sistem linier generator dimana generator di tanam pada dasar laut dan dihubungkan dengan *rope* ke bodi pelampung seperti pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Ilustrasi Bagian Dari Tenaga Ombak Dengan Beberapa Unit Yang Lebih Kecil Dari Konverter Energi Gelombang [5].

Ada kemiripan model linier generator dengan yang diteliti oleh Mats Leijon. Pada penelitian Mats Leijon, 2004 [1] dijelaskan tentang penggunaan magnet permanen tipe tiga fasa pada generator linier untuk mengkonversi energi gelombang air laut ke dalam energi listrik dengan menggunakan simulasi multifisik. Dimana linier generator dipasang langsung pada pembangkit dan diletakkan pada dasar laut. Pada bagian atas linier generator diberi pelampung yang berfungsi untuk menangkap osilasi gelombang air laut, untuk mempermudah dalam pengambilan hasil, Math Leijon menggunakan FEM sebagai alat untuk menyimulasikannya. Sketsa pembangkit listrik tenaga air laut pada gambar 2.5 sebagai berikut.

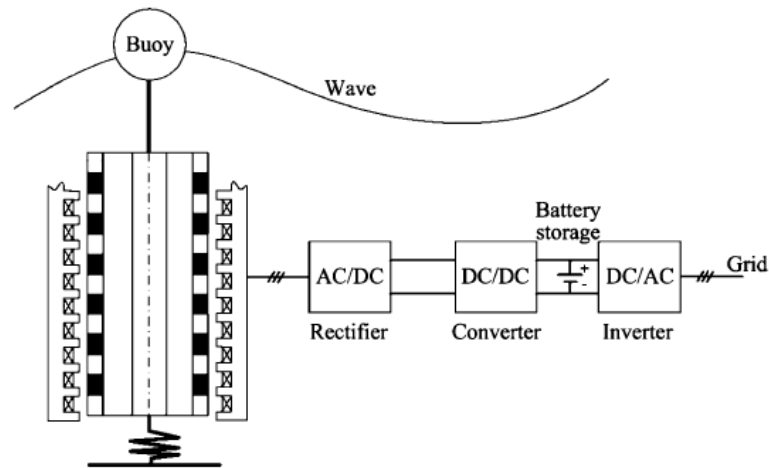


Gambar 2.5 Sketsa *Buoy*, Tali, dan Linier Generator Untuk Pembangkit Tenaga Air Laut Secara Langsung [1].

Kelemahan dari rancangan ini terletak pada desain pembangkit listrik gelombang air laut yang cukup sederhana, yang hanya memanfaatkan gerakan naik turun gelombang laut yang ditangkap oleh pelampung, tidak ada perbandingan roda gigi. Hal ini mengakibatkan getaran osilasi rotor pada linier generator mempunyai frekuensi yang kecil sehingga daya listrik yang dibangkitkan juga sangatlah kecil. Untuk tali *rope* yang digunakan untuk mentransmisikan daya yang ditangkap oleh gelombang air laut adalah tali *rope* tipe solid, dimana tali *rope* jenis ini sangat rawan (tidak begitu kuat) oleh tekanan arus maupun gelombang air laut. Letak linier generator yang berada di dasar laut, sehingga diperlukan konstruksi yang cukup kompleks untuk mendesain agar generator ini menjadi kedap dan tahan air.

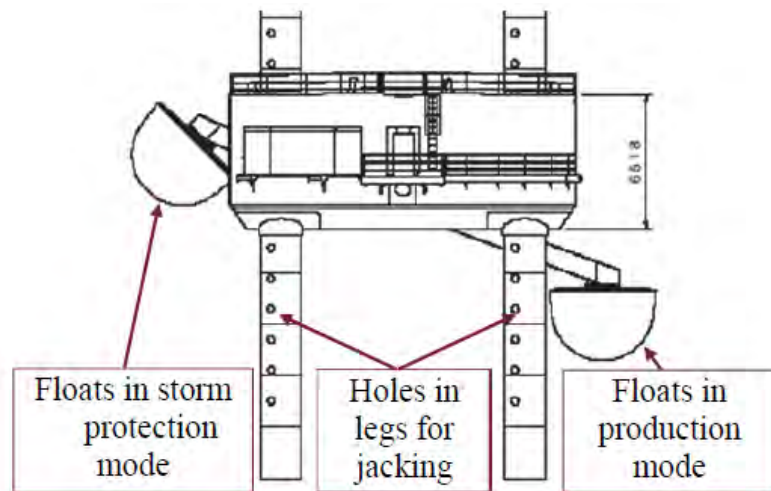
Penelitian yang hampir sama juga dilakukan oleh Wenlong Li et al., 2011 [6] untuk menyempurnakan penelitian Mats Laijon. Wenlong Li melakukan penyempurnaan dengan mengaplikasikan roda gigi italic yang bersifat linier ke dalam linier generator. Selain itu, Wenlong Li juga menambahkan *spring* pada *ground* linier generator. Hal ini dimaksudkan agar menambah getaran osilasi yang diakibatkan oleh gerakan pelampung. Sehingga dihasilkan gerak osilasi dengan frekuensi yang lebih tinggi dari pada desain linier generator yang di

desain oleh Mats Leijon sistem kerja dari desain ini ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Linear Magnetic Gears for Pseudo-Direct-Drive Oceanic Wave Energy [6].

M. Kramer et al., 2011 [7] melakukan kajian yang bersifat eksperimental tentang pembangkit listrik yang dikembangkan menggunakan pelampung (*heavy buoy*) dan telah diaplikasikan di laut Rosage Denmark. Generator yang digunakan adalah generator tipe *rotary*. Pengembangan dilakukan secara bertahap dimulai dengan skala model, pemodelan pada model skala, hingga aplikasi ekperimental yang dilakukan di Aalborg University Denmark. Sistem pembangkit yang dikembangkan oleh Kremer gambar 2.7 berikut:

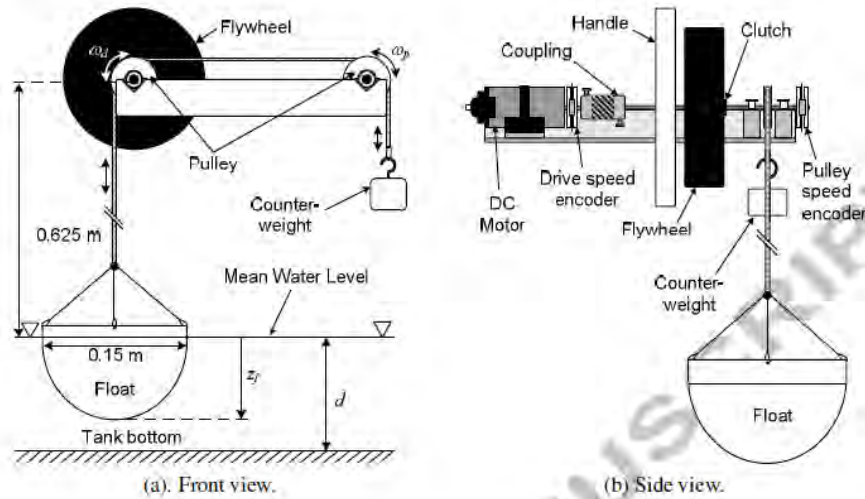


Gambar 2.7 PLTGL oleh *Wave Star Energy* [7].

Penelitian yang sama dikembangkan oleh Lok K. S. et al., 2013 [8]. Dalam penelitiannya mendiskusikan tentang energi listrik yang dihasilkan gerakan

osilasi dari bodi pelampung yang umumnya tidak teratur. Penelitian ini melakukan pemodelan numerik dan pengujian eksperimental skala kecil dari kekuatan take-off sistem naik-turun pelampung. Sebuah kekuatan melepas sistem digunakan untuk memberikan kecepatan tinggi inputan rotasi generator induksi standar.

Sebuah model numerik dari sistem hidrodinamik digunakan untuk mengontrol generator pada respon waktu bervariasi dan output daya dari sistem. Model numerik dengan tiga koefisien hidrodinamika empiris dikalibrasi terhadap eksperimental pengukuran dalam gelombang reguler. Metode kontrol mencakup karakteristik statis dan integral (PI) kontroler proporsional untuk memaksimalkan output daya rata-rata sementara mengurangi tingkat puncak perubahan torsi di driveshaft dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol yang diterapkan. Strategi kontrol dilaksanakan dalam model drive-train dengan skala geometris 1:67. Tes eksperimental dilakukan dan prediksi model bervariasi waktu respon memiliki bentuk mirip dengan respon yang terukur. Output daya rata-rata dari gelombang tidak teratur diperkirakan berjarak 11% untuk frekuensi kurang dari 1,3 Hz (periode lebih besar dari 6,3 s skala penuh) dan gelombang tinggi lebih besar dari 30 mm (2 m skala penuh) [8] seperti pada gambar 2.8 berikut.



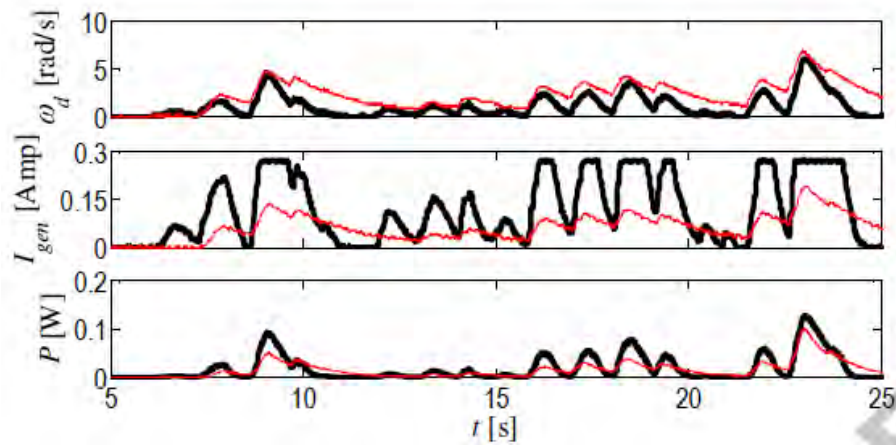
Gambar 2.8 Sistem Mekanik *Drive-Train* Skala Lab [8].

Daya yang diperoleh sebagai hasil dari torsi diterapkan dan kecepatan:

$$P = I_{net} k_{\tau} \times \omega_d = (I_{gen} + I_{fr}) k_{\tau} \times \omega_d \quad \dots(2.1)$$

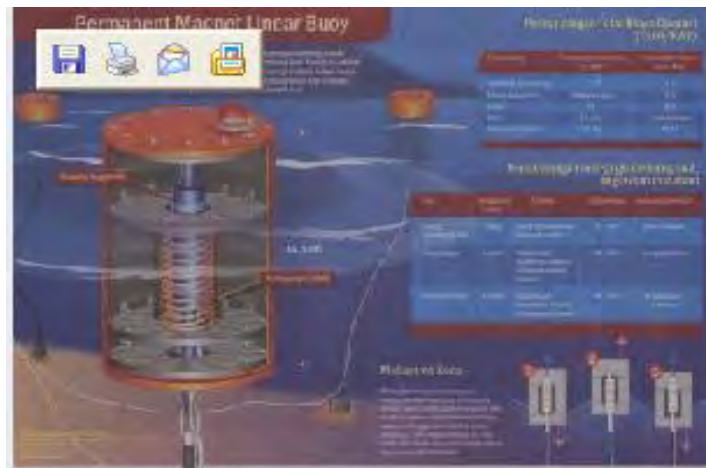
Torsi Generator τ_{gen} dihasilkan oleh torsi generator tegangan arus V_{torq} dari

perubahan arus. Torsi Generator I_{net} saat ini terdiri dari torsi pembangkit I_{gen} dan saat torsi membantu I_{fr} (yaitu $I_{\text{net}} = I_{\text{gen}} + I_{\text{fr}}$), yang merupakan torsi gesekan pada drive-train dan diterapkan dalam arah yang berlawanan dengan torsi pembangkit I_{gen} . Adapun grafik hubungan torsi inputan terhadap energi yang dihasilkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.9 Grafik Pengaruh Torsi Terhadap Energi Yang Dihasilkan Skala Lab [8].

Sebuah teknologi terbaru yang diberi nama *Permanent Magnet Linear Buoy* yang dikembangkan oleh K. Rhinefrank et al., 2006 [9]. Teknologi terbaru tersebut dipasang untuk memanfaatkan gelombang laut di permukaan. Berbeda dengan *buoy* yang digunakan untuk mendeteksi gelombang laut yang menyimpan potensi tsunami. Penelitian di Oregon menjelaskan prinsip dasar *buoy* penghasil listrik tersebut yaitu dengan mengapungkannya di permukaan. Gelombang laut yang terus mengalir dan berirama bolak-balik dalam *buoy* ini akan diubah menjadi gerakan harmonis listrik. Sekilas bila dilihat dari bentuknya, *buoy* ini mirip dengan dinamo sepeda.



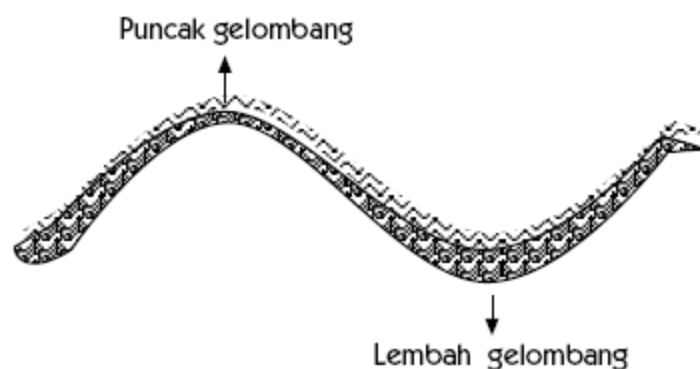
Gambar 2.10 *Magnet Linear Buoy* [9].

Berdasarkan hasil penelitian Universitas Oregon, setiap pelampung mampu menghasilkan daya sebesar 250 kilowatt. Penjelasan di atas menggunakan teknik koil yang bergerak naik turun, kelemahan dari sistem ini kurang maksimal karena bentuk-bentuknya sangat kecil dan memerlukan pemasangan yang sangat banyak.

2.2 Teori Penunjang

2.2.1 Teori Gelombang Laut

Gelombang laut merupakan energi dalam transisi, merupakan energi yang terbawa oleh sifat aslinya. Prinsip dasar terjadinya gelombang laut adalah sebagai berikut: " *Jika ada dua massa benda yang berbeda kerapatannya (densitasnya) bergesekan satu sama lain, maka pada bidang gerakanya akan terbentuk gelombang.* " Gelombang merupakan gerakan naik turunnya air laut. Hal ini seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Pergerakan Air Laut [10].

Proses terbentuknya pembangkitan gelombang laut oleh gerakan angin belum sepenuhnya dapat dimengerti, atau dapat dijelaskan secara terperinci. Tetapi menurut perkiraan, gelombang terjadi karena hembusan angin secara teratur, terus-menerus di atas permukaan air laut [10]. Hembusan angin yang demikian akan membentuk riak permukaan, yang bergerak searah dengan hembusan angin (lihat Gambar 2.12).



Gambar 2.12 Proses Pembentukan Gelombang Akibat Angin

Bila angin masih terus berhembus dalam waktu yang cukup panjang dan meliputi jarak permukaan laut (*fetch*) yang cukup besar, maka riak air akan tumbuh menjadi gelombang. Pada saat yang bersamaan, riak permukaan baru akan terbentuk di atas gelombang yang terbentuk, dan selanjutnya akan berkembang menjadi gelombang – gelombang baru tersendiri. Proses yang demikian tentunya akan berjalan terus menerus (kontinyu), dan bila gelombang diamati pada waktu dan tempat tertentu, akan terlihat sebagai kombinasi perubahan-perubahan panjang gelombang dan tinggi gelombang yang saling bertautan. Komponen gelombang secara individu masih akan mempunyai sifat-sifat seperti gelombang pada kondisi ideal, yang tidak terpengaruh oleh gelombang-gelombang lain. Sedang dalam kenyataannya, sebagai contoh, gelombang-gelombang yang bergerak secara cepat akan melewati gelombang-gelombang lain yang lebih pendek (lamban), yang selanjutnya mengakibatkan terjadinya perubahan yang terus-menerus bersamaan dengan gerakan gelombang-gelombang yang saling melampaui [11].

Sebuah gelombang terdiri dari beberapa bagian antara lain:

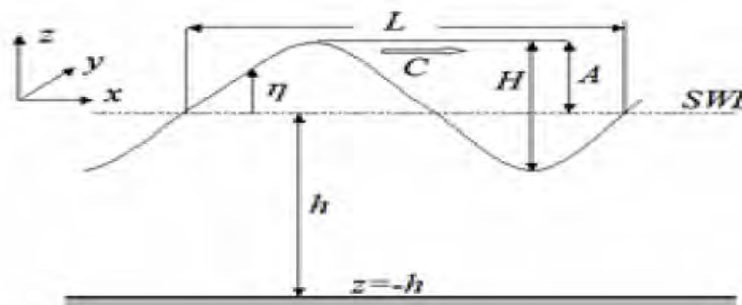
- a. Puncak gelombang (Crest) adalah titik tertinggi dari sebuah gelombang.

- b. Lembah gelombang (Trough) adalah titik terendah gelombang, diantara dua puncak gelombang.
- c. Panjang gelombang (Wave length) adalah jarak mendatar antara dua puncak gelombang atau antara dua lembah gelombang.
- d. Tinggi gelombang (Wave height) adalah jarak tegak antara puncak dan lembah gelombang.
- e. Periode gelombang (Wave period) adalah waktu yang diperlukan oleh dua puncak gelombang yang berurutan untuk melalui satu titik.

Bhat (1978), Garisson (1993), dan Gross (1993) mengemukakan bahwa ada 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang, yakni:

- a. Amplitudo gelombang (A) adalah jarak antara puncak gelombang dengan permukaan rata-rata air.
- b. Frekuensi gelombang (f) adalah sejumlah besar gelombang yang melintasi suatu titik dalam suatu waktu tertentu (biasanya didefinisikan dalam satuan detik).
- c. Kecepatan gelombang (C) adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu.
- d. Kemiringan gelombang (H/L) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang.

Sebagai dasar penentuan spektrum (kandungan energi gelombang), diperlukan beberapa istilah/ukuran gelombang yang ditunjukkan Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Sketsa Gelombang Laut [11].

Gambar diatas menunjukkan gelombang yang berada dalam koordinat x-y dan merambat pada sumbu x. Beberapa notasi yang dikembangkan oleh Djabbar

dan Baharuddin seperti gambar diatas adalah sebagai berikut:

d : Jarak antara muka air rata dan dasar laut (kedalaman laut)

η : Fluktuasi muka air terhadap muka air diam $= \eta = a \cos (kx - \sigma t)$

a : Amplitudo gelombang

H : Tinggi gelombang $= 2a$

L : Panjang gelombang, jarak antara dua puncak gelombang yang berurutan

T : Periode gelombang, yaitu interval waktu yang diperlukan oleh partikel air untuk kembali pada kedudukan yang sama dengan sebelumnya

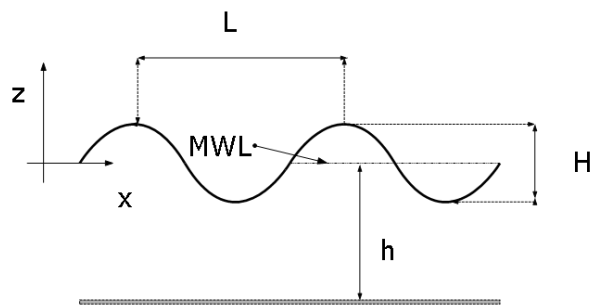
C : Kecepatan rambat gelombang $= L/T$

k : Angka gelombang $= 2\pi / L$

σ : Frekuensi gelombang $= 2\pi / T$

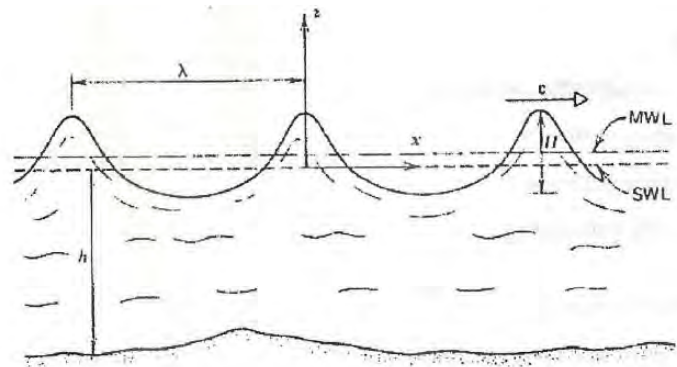
g : Gravitasi $= 9,81 \text{ m / s}^2$

Pemahaman mengenai keadaan fisik gelombang air laut sangat penting dibutuhkan untuk mendalami sistem pembangkit listrik tenaga gelombang air laut. Hal ini dikarenakan pada sistem pembangkit listrik tenaga air laut menggunakan gelombang air laut sebagai gaya eksitasi yang bekerja pada sistem. Pada gambar 2.14 menampilkan gelombang air laut linier.



Gambar 2.14 Karakteristik Gelombang Laut Linear [12].

Pada dasarnya gelombang laut dibagi dalam beberapa tipe, diantaranya gelombang linier dan non linier [12]. Gelombang linier mempunyai ciri khusus yaitu berbentuk sinusoidal. Suatu gelombang laut yang dalam dengan nilai H/λ kecil merambat dengan profil sinusoidal merupakan gelombang linier, tetapi bila rambatannya mencapai kedangkalan tertentu maka profil gelombangnya akan berubah dengan puncak gelombang yang meruncing disertai dengan panjang gelombang yang mengecil



Gambar 2.15 Karakteristik Gelombang Laut Non Linear [12].

Pada gelombang non-linier, permukaan air laut (SWL) dan muka air rata-rata (MWL) mempunyai selisih tertentu. Bila batas SWL dan MWL berhimpit maka gelombang non linier akan berubah kembali menjadi gelombang linier. Untuk gelombang non linier, kedudukan SWL selalu dibawah MWL. Menurut pengertian para ahli, kedudukan MWL adalah selalu berada pada setengah dari puncak gelombang dan dasar gelombang.

Baik gelombang linier maupun gelombang nonlinier bergerak pada sumbu x. Beberapa notasi di dalam pemodelan yang dikembangkan sebagai berikut:

MWL : *Mean Sea Water Level* (muka air tenang rata-rata)

SWL : *Surface Sea Water Level* (permukaan air laut)

λ : *Wave Length* [m]

h : *Depth below SWL* (kedalaman) [m]

T : *Wave periode* [s]

c : Kecepatan rambat gelombang (*wave front velocity*) [m/s]

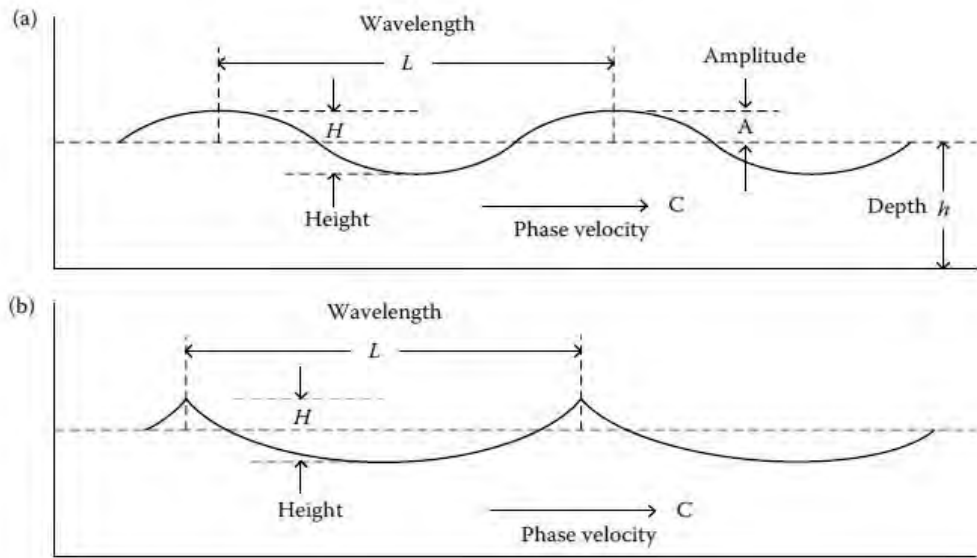
H : Amplitudo gelombang

2.2.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut

Energi laut datang dalam berbagai bentuk seperti arus laut, arus pasang surut, ventilasi panas bumi, dan gelombang. Semua terkonsentrasi bentuk energi surya atau gravitasi sampai batas tertentu. Selain itu, energi gelombang memberikan "15-20 kali lebih banyak energi tersedia per meter persegi dari baik angin atau matahari. Yang paling komersial sumber belajar sejauh ini gelombang. Energi gelombang total adalah jumlah dari energi kinetic dan energi potensial [13]. Total energi potensial dan energi kinetic dapat dirumuskan:

$$E_{density} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{H^2}{8} = \rho_{water} \cdot g \cdot A^2 / 2 \quad \dots(2.2)$$

$$P_{density} = \frac{E_{density}}{T} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{H^2}{(8T)} = \rho_{water} \cdot g \cdot A^2 / (2T) \quad \dots(2.3)$$



Gambar 2.16 Karakteristik Gelombang [13].

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2 \quad \dots(2.4)$$

Dengan :

E = Energi potensial (joule)

g = Percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

ρ = Densitas air (1000 kg/m³)

A = Amplitude gelombang (m)

Untuk mendapatkan rata – rata energi atau daya dari periode gelombang, energi E dikalikan dengan kecepatan rambat gelombang (v_g), (Michael Mc Cormick, 2010) [14].

$$v_g = \frac{L}{2T} \quad \dots(2.5)$$

Dengan keterangan T adalah periode gelombang (s) dan L adalah panjang gelombang (m).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho g A^2 \frac{L}{2T} \quad \dots(2.6)$$

Jika periode gelombang dan panjang dihubungkan, sehingga

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \dots(2.7)$$

Sehingga didapatkan :

$$\begin{aligned}
 P_w &= \frac{\rho g A^2 T}{8\pi} \\
 P_w &= \frac{\rho \cdot g^2 \cdot (\eta_{(x,t)})^2 \cdot T}{8\pi} \\
 P_w &= \frac{\rho \cdot g^2}{8\pi} \left(\frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \right)^2 \cdot T \\
 &= \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T (\cos(kx - \sigma t))^2}{32\pi} \quad \dots(2.8)
 \end{aligned}$$

Dimana:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \dots(2.9)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad \dots(2.10)$$

Dengan trigonometri maka persamaan (2.8) dapat diuraikan sebagai berikut:

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T (\cos(kx - \sigma t))^2}{32\pi} \quad \dots(2.11)$$

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (\cos kx \cdot \cos \sigma t + \sin kx \cdot \sin \sigma t)^2$$

Pada saat $x = 0$, karena posisi pelampung tetap pada posisi awal, maka dapat diselesaikan sebagai berikut:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (\cos k \cdot 0 \cdot \cos \sigma t + \sin k \cdot 0 \cdot \sin \sigma t)^2$$

$$\cos 0 = 1$$

$$\sin 0 = 0$$

Maka:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (1 \cdot \cos \sigma t + 0)^2$$

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (1 \cdot \cos \sigma t)^2 \quad \dots(2.12)$$

Substitusikan persamaan 2.10 ke persamaan 2.12, maka:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = \left(1 \cdot \cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \quad \dots(2.13)$$

Substitusikan persamaan 2.13 ke persamaan 2.11, maka:

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \quad \dots(2.14)$$

Dari persamaan 2.14 diatas, dapat diketahui gaya gelombang yang dikonversikan oleh mekanisme pelampung dengan rumusan sebagai berikut,

$$F_{wave} = \frac{P_{wave}}{c_g} \quad \dots(2.15)$$

$$\text{Sehingga } F_{\text{wave}} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi c_g} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2$$

Dimana c_g merupakan setengah cepat rambat suatu gelombang (c) dengan persamaan:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{2} c_g$$

$$c_g = 2c$$

$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi c_g} = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64\pi \lambda} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \quad \dots(2.16)$$

Keterangan :

g = Percepatan grafitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

ρ = Densitas air (1000 kg/m^3)

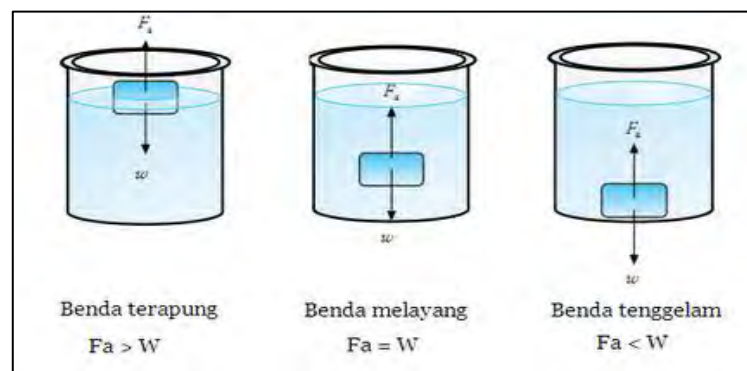
A = Amplitudo gelombang (m)

λ = Panjang gelombang (m)

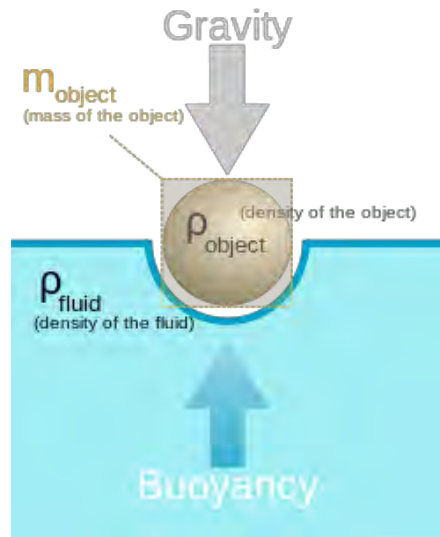
T = Periode gelombang (s)

2.2.3 Gaya Apung (Bouyancy Force)

Gaya apung atau *bouyancy force* (F_b), yaitu gaya tekan keatas pada suatu benda yang mengapung sama dengan berat air yang dipindahkan (*Archimedes Principle*). Gaya *buoyancy* selalu sama dengan berat fluida yang dipindahkan (dapat di lihat pada Gambar 2.17)



Gambar 2.17 (a) Benda Terapung, (b) Benda Melayang, (c) Benda Tenggelam



Gambar 2.18 Analisa Gaya Yang Dihasilkan Pelampung [20]

$$F_b = \rho_{fluida} . V_{benda} \cdot g \quad \dots(2.17)$$

Dimana:

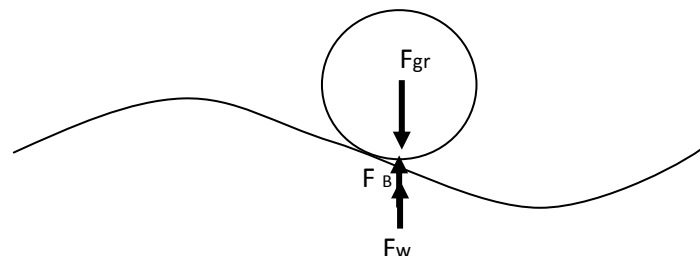
ρ = Berat jenis air (kg/m^3)

V = Volume benda tenggelam (m^3)

g = Gaya gravitasi (m/s^2)

2.2.4 Gaya Generated

Gaya yang dihasilkan ($F_{\text{generated}}$) merupakan resultan gaya yang dihasilkan oleh gelombang laut untuk dapat menggerakkan lengan dan pergerakan diteruskan ke roda gigi utama untuk menggerakkan generator. FBD pelampung dapat terlihat pada gambar 2.19



Gambar 2.19 Gaya-Gaya yang Bekerja Pada Pelampung

$$\begin{aligned} F_{generated} &= (F_w + F_b) - F_{gravitasi} \\ &= [F_w + (\rho_{fluida} . V_{fluida \text{ tercelup}} \cdot g)] - (m \cdot g) \quad \dots (2.18) \end{aligned}$$

Dimana, $F_{\text{generated}}$ adalah gaya yang ditransferkan oleh gelombang, F_w adalah gaya yang dihasilkan oleh gelombang, F_b adalah gaya apung pelampung, $F_{\text{gravitasi}}$ adalah gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang.

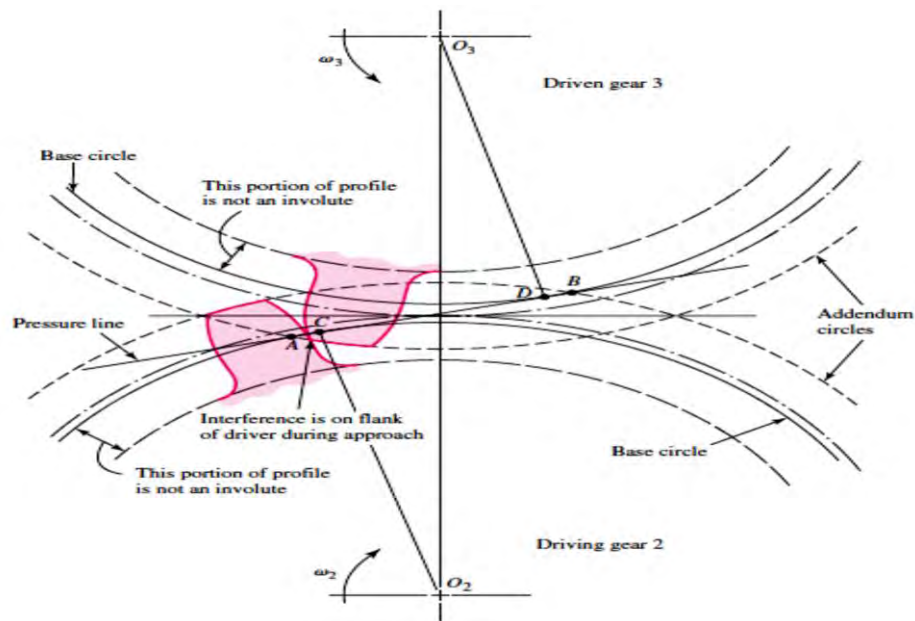
2.3 Roda Gigi (*Gearbox*)

2.3.1 Roda Gigi Secara Umum

Roda gigi berfungsi untuk mentransmisikan daya yang cukup besar dengan putaran yang tepat, yang tidak dapat dilakukan oleh roda biasa (roda gesek). Maka roda tersebut harus bergerigi/bergigi pada kelilingnya, sehingga dapat dilakukan penerusan daya oleh gigi-gigi kedua roda yang saling berkaitan. Selain pemakaian roda gigi pada transmisi, terdapat cara lain untuk meneruskan daya, cara tersebut adalah dengan menggunakan sabuk. Sabuk yang digunakan (sabuk rata, sabuk v, sabuk gigi/serempak) dan rantai (rantai nol, rantai gigi). Diantara penerus daya tersebut akan lebih ringkas, dapat digunakan untuk putaran tinggi dengan tepat dan daya yang cukup besar.

Roda gigi secara umum merupakan suatu mekanisme yang dipergunakan untuk memindahkan elemen mesin yang satu kegerakan elemen mesin yang lain. Selain itu roda gigi juga berfungsi mengubah jumlah putaran dan momen putar mesin, daya mesin serta mengatur keduanya untuk kebutuhan kerja mesin. Ketika kendaraan mulai berjalan diperlukan tenaga yang besar, setelah kendaraan berjalan bukan tenaga lagi yang diperlukan melainkan kecepatan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut diperlukan transmisi yang lebih dari berbagai tingkat perbandingan gigi. Sebuah kotak transmisi pada prinsipnya terdiri atas tiga bagian yaitu:

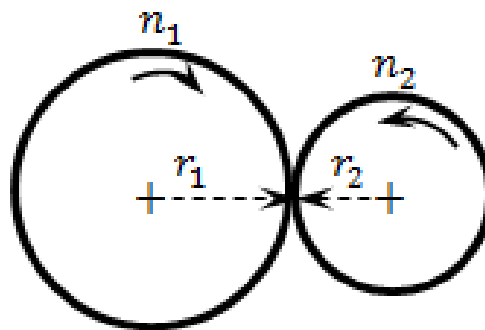
- a. Poros penggerak
- b. Poros yang digerakkan
- c. Rangka pengikat



Gambar 2.20 Bagian Roda Gigi [16]

2.3.2 Ratio Gigi

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut diperlukannya transmisi yang terdiri dari berbagai tingkat perbandingan gigi (Gear Ratio). Perakitan/hubungan gear yang berada dalam kotak transmisi (*gear box*). Perubahan tersebut dikarenakan perbandingan rasio pada *gear* yang digunakan. Perbandingan rasio merupakan hasil bagi antara jari-jari output dengan jari input, Close, 2002 [17]. Maka untuk mencari rasio roda gigi dapat digunakan persamaan sebagai berikut:



Gambar 2.21 Perbandingan Rasio Roda Gigi [17].

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{r_2}{r_1} = N \quad \dots(2.19)$$

Dimana:

$$r_1 \cdot \theta_1 = r_2 \cdot \theta_2$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1} = N$$

Keterangan:

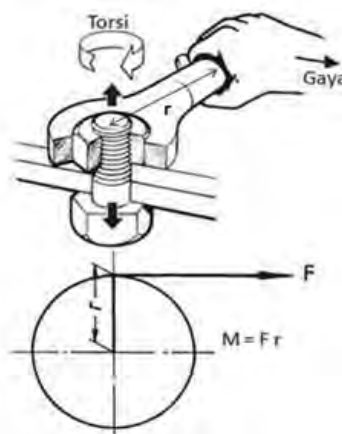
r_1 = Jari-jari roda gigi input (m).

r_2 = Jari-jari roda gigi output (m).

N = Rasio gear (m).

2.3.3 Momen Torsi

Momen adalah suatu vektor M yang tegak lurus terhadap bidang benda. Arah M adalah tergantung pada arah berputarnya benda akibat gaya F . Momen torsi terlihat pada Gambar 2.22. Momen dapat dihitung dengan rumus berikut:



Gambar 2.22 Torsi yang Bekerja Pada Poros Utama [21]

$$Mt = F \cdot r \quad \dots(2.20)$$

Dimana M adalah momen, F adalah gaya yang bekerja, dan r adalah lengan gaya. Arah dari momen dapat ditentukan dengan menggunakan konversi tanda misalnya tanda plus (+) untuk arah momen yang berlawanan arah jarum jam, dan tanda minus (-) untuk yang searah jarum jam. Penentuan tanda dari momen ini harus konsisten untuk semua persoalan.

2.3.4 Momen Inersia

Momen inersia adalah hasil kali massa sebuah partikel (m) dengan kuadrat jarak partikel dari titik rotasinya (r). Jarak setiap partikel yang menyusun benda tegar berbeda – beda jika diukur dari sumbu rotasi. Ada yang berada di tepi ada yang dekat dengan sumbu rotasinya dan lain- lainnya. Berikut ini adalah beberapa

persamaan momen inersia untuk benda tegar. Jika benda berupa poros maka momen inersianya adalah:

$$J = \frac{1}{2} \times m \times r^2 \quad \dots(2.21)$$

2.3.5 Konstanta Kekakuan Torsi Poros

Konstanta kekakuan torsi poros merupakan perkalian modulus elastisitas bahan dengan diameter poros dan panjang poros [15] maka untuk mencari kekakuan torsi poros digunakan persamaan sebagai berikut:

$$K = \frac{\pi \times G}{32 \times l} \times d^4 \quad \dots(2.22)$$

Keterangan:

K = Kekakuan torsi poros (Nm/rad)

G = Modulus elastisitas bahan (N/m²), bahan yang digunakan *gray cast iron*, sehingga besarnya G = 6,6 x 10¹⁰ N/m²

l = Panjang poros (m).

d = Diameter poros (m).

2.3.6 Konstanta Damping Torsi

Gaya gesek yang diterima dari poros jika poros itu diputar, untuk menghitung damping torsi (B_t) adalah *viscosity* dikali luas permukaan kontak dibagi ketebalan viskositas fluida [15], maka untuk mencari damping torsi dapat digunakan persamaan berikut.

$$B_t = \frac{\mu \cdot A}{h} \quad \dots(2.23)$$

Keterangan:

B_t = Konstanta damping bearing

μ = Viscosity (Pa-s)

A = Luas area kontak (m²)

h = Ketebalan viscous fluid (m)

2.4 Teori Mekanika Getaran

Secara umum getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awal melalui titik keseimbangan. Setiap komponen mekanikal memiliki berat dan *properties* yang menyerupai pegas. Ada dua kelompok umum

dari getaran, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Getaran memiliki ciri-ciri, di antaranya:

1. Untuk menempuh lintasan satu getaran diperlukan waktu yang biasa disebut periode.
2. Banyaknya getaran dalam satu sekon disebut frekuensi (f).

Semua sistem yang bergetar mengalami redaman sampai derajat tertentu karena energi terdisipasi oleh gesekan dan tahanan lain. Jika redaman kecil maka pengaruhnya sangat kecil terhadap frekuensi naturalnya, dan perhitungan frekuensi natural biasanya dilakukan atas dasar tidak ada redaman.

2.5 Generator

Generator merupakan salah satu mesin listrik, yang mengubah energi gerak atau mekanik menjadi energi listrik [18]. Generator terdiri atas dua bagian utama yaitu kumparan jangkar dan kumparan medan yang ditempatkan pada stator dan rotor. Stator adalah bagian yang diam / tetap, dan rotor adalah bagian yang berputar pada mesin.

Michael Faraday (1791-1867) mengatakan, prinsip kerja generator berdasarkan Hukum *Faraday* yang mengandung pengertian bahwa apabila sepotong kawat penghantar listrik berada dalam medanmagnet berubah-ubah, maka di dalam kawat tersebut akan terbentuk Gaya Gerak Listrik induksi. Demikian pula sebaliknya bila sepotong kawat penghantar listrik digerakkan dalam medan magnet maka kawat penghantar tersebut juga terbentuk Gaya Gerak Listrik induksi.

Hukum *Faraday* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

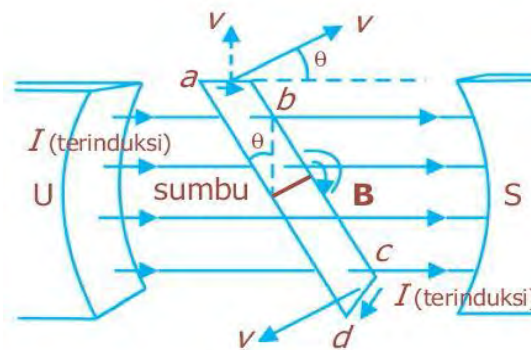
$$e = - N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \dots (2.24)$$

Di mana e adalah Gaya Gerak Listrik induksi yang dibangkitkan dalam satuan Volt, N adalah banyaknya jumlah lilitan, $\Delta\Phi$ adalah perubahan fluk magnetik dalam satuan Webber dan Δt adalah perubahan waktu dalam satuan detik. Atau dengan persamaan lain nilai dari Gaya Gerak Listrik induksi dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$e = B.l.v \quad \dots (2.25)$$

Di mana e adalah Gaya Gerak Listrik induksi yang dibangkitkan dalam satuan Volt, B adalah kerapatan medan magnet dalam satuan Tesla, l adalah panjang kawat dalam satuan m dan v adalah kecepatan konduktor memotong medan magnet dalam satuan meter per second

Tegangan GGL induksi yang dibangkitkan dapat dikatakan tergantung pada faktor jumlah dari lilitan dalam kumparan, kuat medan magnet, kecepatan putar poros generator. Semakin banyak jumlah kumparan maka semakin besar tegangan yang diinduksikan. Semakin kuat medan magnet maka semakin besar tegangan yang diinduksikan. Semakin besar kecepatan putar poros generator maka semakin besar tegangan yang diinduksikan.



Gambar 2.23 GGL Induksi Terjadi Pada Potongan a-b dan c-d Yang Berputar [18].

Persamaan di atas dapat berlaku jika komponen v tegak lurus terhadap B . Resultan GGL induksi, E , yang terjadi merupakan jumlah GGL terinduksi di a-b (11) dan c-d (12), yang memiliki besar dan arah yang sama, sehingga persamaan diatas berubah menjadi berikut:

$$e = N.B.2.l.v. \sin \theta \quad \dots (2.26)$$

Dengan N merupakan jumlah loop dalam kumparan. Apabila kumparan berputar dengan kecepatan angular konstan ω , maka besar perubahan sudutnya adalah sebagai berikut.

$$v = \omega .r = \omega h /2 \quad \dots(2.27)$$

Di mana h menyatakan panjang b-c dan a-d, sebagai panjang lilitan kumparan dan r adalah jari-jari lilitan sebesar setengah h . Persamaan tegangan

listrik bangkitan yang melewati kumparan sebanyak N lilitan adalah sebagai berikut.

$$e = N.B.2.l.\omega. \sin \theta \quad \dots(2.28)$$

Di mana e adalah tegangan GGL induksi yang dibangkitkan dalam satuan Volt, N adalah jumlah lilitan per kumparan, B adalah kekuatan medan magnet dalam satuan Tesla, A adalah luas penampang kumparan dalam satuan m^2 , dan ω adalah kecepatan putar magnet atau rotor. Jika dianggap daya listrik bangkitan maksimum terjadi pada $\theta = 90$ derajat atau $\sin 90$ sama dengan 1, maka persamaan di atas. menjadi berikut.

$$e = N.B.A.\omega. \quad \dots(2.29)$$

Energi listrik bangkitan yang terjadi dalam selang waktu Δt adalah sebagai berikut :

$$W = e.I.\Delta t$$

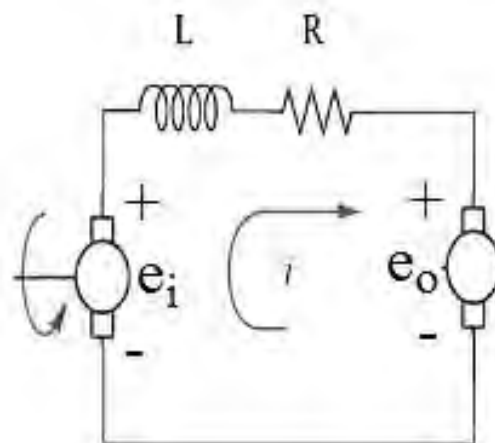
$$W = (e^2.\Delta t)/R \quad \dots(2.30)$$

Jika R adalah hambatan pada sirkuit generator maka redaman torsional yang timbul dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C = \frac{(N.B.A)^2}{R} \quad \dots(2.31)$$

Dimana C adalah redaman torsional yang disebabkan oleh N , B , A dan R .

Persamaan gerak dari *armature* generator dapat diperoleh dengan meninjau skema diagram mekanis generator gambar 2.24. Adapun persamaan gerak tersebut adalah sebagai berikut.



Gambar 2.24 Skema Generator Listrik [17].

$$\sum T = 0$$

$$-J.\dot{\omega} - B\omega - T_e + T_g = 0$$

$$T_g - T_e = J.\dot{\omega} + B\omega \quad \dots(2.32)$$

Maka T_g adalah torsi input mekanis yang menggerakkan generator, T_e adalah beban elektrik, J adalah inersia *armature*, B adalah redaman friksi mekanis generator, dan ω adalah kecepatan putar generator. Adapun perumusan T_e adalah sebagai berikut.

$$T_e = \alpha' \omega(t) = (2.N.B.l.r) \cdot \omega(t) \quad \dots(2.33)$$

Dimana α' coupling factor dengan nilai $2.N.B.l.r$

Pada kondisi praktis, nilai induktansi lilitan sering dianggap kecil dan dapat diabaikan. Oleh karena itu, persamaan 2.31 dapat diubah menjadi persamaan berikut.

$$\alpha' \cdot \omega(t) = R.i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + \alpha' \cdot i(t)$$

$$\alpha' \cdot \omega(t) = R.i(t) + \alpha' \cdot i(t)$$

$$\alpha' \cdot \omega(t) = (R + \alpha') \cdot i(t)$$

$$\frac{\alpha'}{(R + \alpha')} \cdot \omega(t) = i(t) \quad \dots(2.34)$$

Dengan memadukan persamaan tersebut dengan output $e_o(t)$ pada persamaan diatas maka kita akan mendapatkan energi bangkitan, $E(t)$.

$$E(t) = e_o(t).i(t) = \alpha' . i(t).i(t) = \alpha' \left[\frac{\alpha'}{(R + \alpha')} \omega(t) \right]^2 = \frac{(\alpha')^3}{(R + \alpha')^2} \cdot \omega(t)^2 \quad \dots(2.35)$$

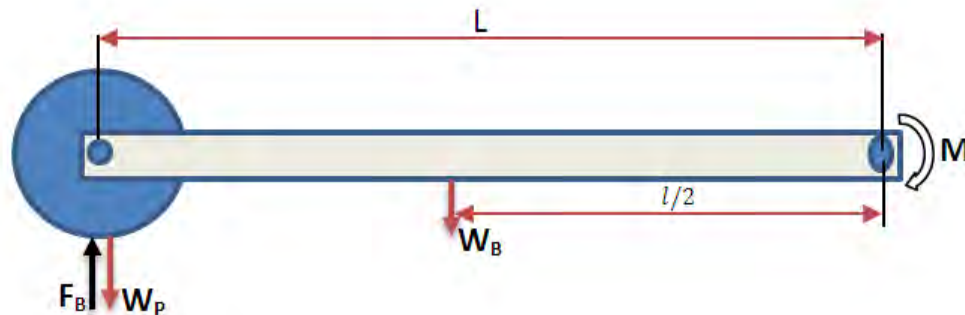
2.6 Analisa Gaya Pada Mekanisme

Gaya-gaya yang bekerja pada mekanisme pembangkit terbagi atas dua analisa yaitu keseimbangan statis dan keseimbangan dinamis. Terdapat gaya-gaya yang bekerja pada masing-masing analisa keseimbangan. Variasi yang digunakan pada mekanisme berupa panjang lengan dan variasi berdasarkan massa pelampung.

2.6.1 Kestimbangan Statis

Kestimbangan statis terjadi diakibatkan oleh mekanisme itu sendiri tanpa di pengaruhi oleh gaya luar. Kestimbangan statis ini hanya diakibatkan oleh berat

pelampung, berat batang pengungkit dan gaya apung (*buoyance*) yang terjadi pada pelampung.



Gambar 2.25 Mekanisme Kesetimbangan Statis Posisi Titik Tumpu Pada Sebuah Poros.

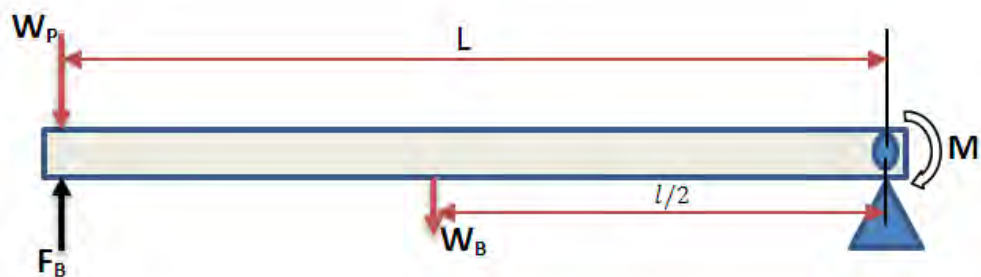
Dimana:

W_p = Berat pelampung (N).

W_b = Berat lengan (N).

F_B = Gaya buoyancy (N).

L = Panjang lengan (m).



Gambar 2.26 *Free Body Diagram* Pada Kesetimbangan Statis

Pada kondisi statis pelampung dianggap sebagai benda yang menjadi satu dengan *cantilever*, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_p = m_p \cdot L^2$$

$$J_b = \frac{1}{3} m_b \cdot L^2$$

$$J_0 = J_b + J_p$$

$$J_0 = \frac{1}{3} m_b L^2 + m_p L^2 \quad \dots(2.36)$$

Pada hukum newton 2 mengatakan bahwa

$$\sum M = 0$$

$$F_b \cdot l - w_b \cdot \frac{l}{2} - w_p \cdot l = 0$$

$$F_b \cdot l - w_b \cdot \frac{l}{2} - w_p \cdot l = 0 \quad \dots(2.37)$$

Pada keseimbangan statis didapatkan rumusan hubungan antara gaya *buoyancy* dan massa pelampung sebagai berikut:

$$F_b \cdot l = w_b \cdot \frac{l}{2} + w_p \cdot l$$

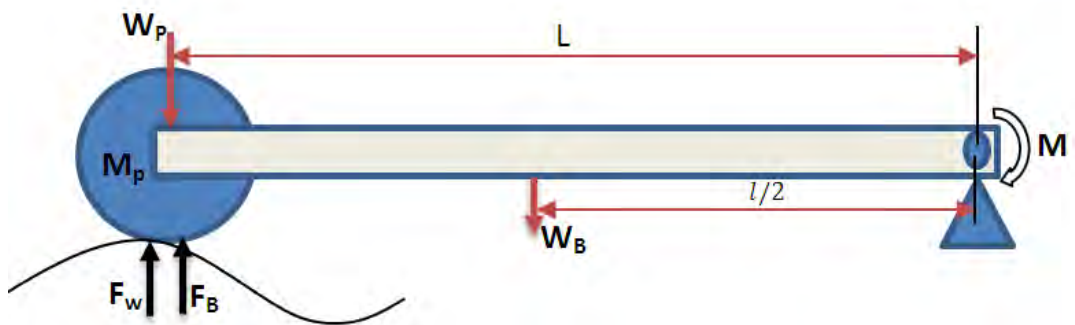
$$F_b \cdot l = m_b \cdot g \cdot \frac{l}{2} + m_p \cdot g \cdot l$$

$$F_b = \frac{1}{l} \left(m_b \cdot g \cdot \frac{l}{2} + m_p \cdot g \cdot l \right)$$

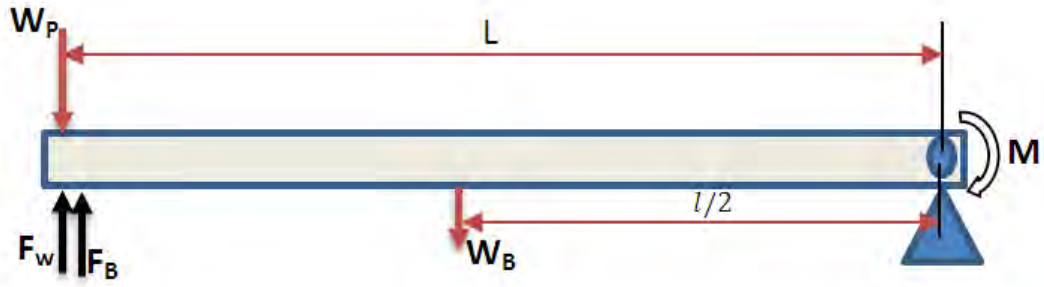
$$F_b = \frac{m_b}{2} \cdot g + m_p \cdot g = \left(\frac{m_b}{2} + m_p \right) g \quad \dots(2.38)$$

2.6.2 Kestimbangan Dinamis

Kesetimbangan dinamis terjadi saat ada gelombang yang datang mengenai pelampung sehingga jumlah gaya atau gaya berat yang bekerja pada sistem sama dengan nol. Kestimbangan dinamis bisa terjadi karena adanya pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada arah vertikal dan arah horizontal yang disebabkan oleh gelombang laut.



Gambar 2.27 Mekanisme Sistem Dinamis Pada Lengan



Gambar 2.28 *Free Body* Diagram Kestimbangan Dinamis Pada Lengan Dan Pelampung

$$\sum T = J_0 \ddot{\theta}$$

$$F_b \cdot l + F_w \cdot l - W_p(l + l \sin \theta) - W_b \left(\frac{l}{2} + \frac{l}{2} \sin \theta \right) - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta} \quad \dots(2.39)$$

Akibat dari kestimbangan statis yang terjadi pada mekanisme maka persamaan (2.34) disubstitusikan kepersamaan (2.37). Maka menjadi:

$$F_w \cdot l - W_p l \sin \theta - W_b \cdot \frac{l}{2} \sin \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta}_0$$

Dimana $\sin \theta = \theta$, maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$F_w \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta}_0$$

$$\ddot{\theta}_0 = \frac{l}{J_0} \left[F_w \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right] \quad \dots(2.40)$$

Dimana gaya *wave* adalah:

$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2 \pi t}{T} \right)^2 \quad \dots(2.41)$$

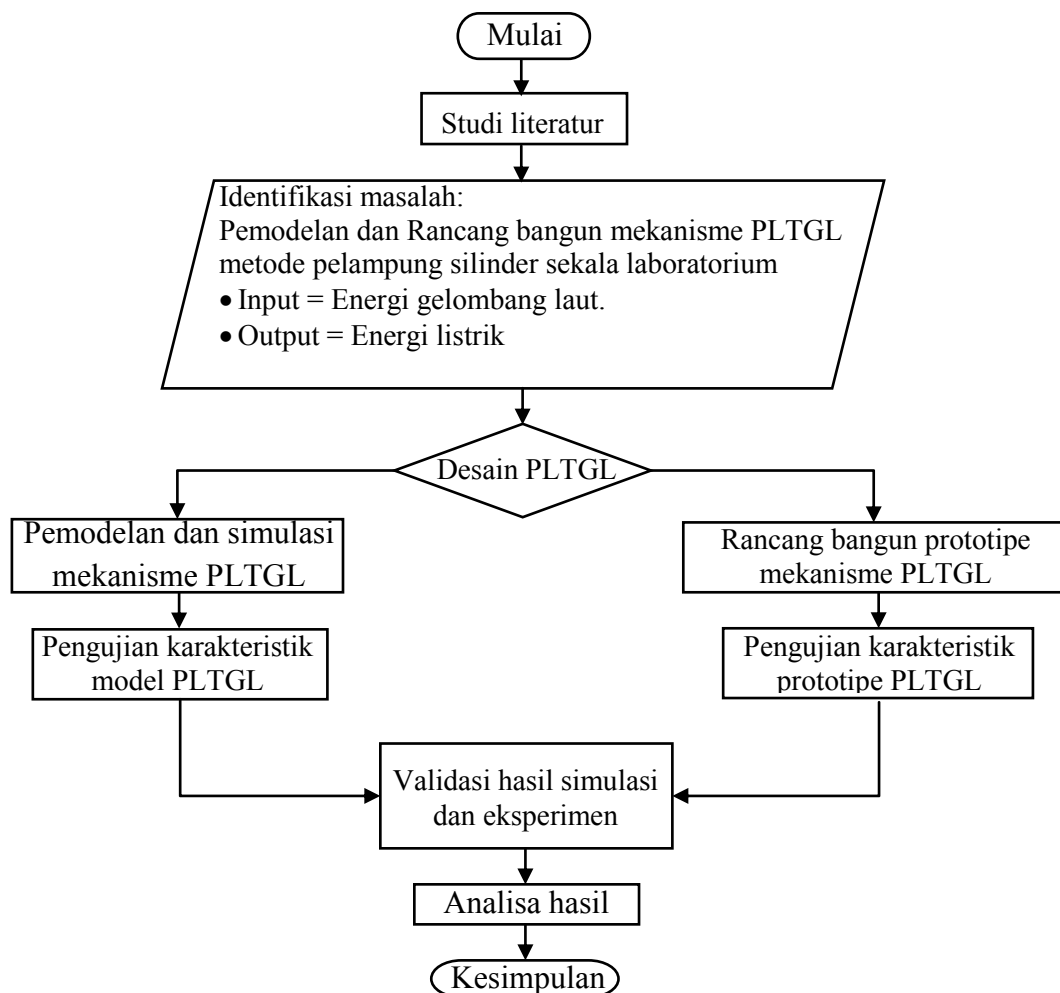
Substitusikan persamaan (2.34), dan (2.39) kepersamaan (2.38), maka diperoleh:

$$\ddot{\theta}_0 = \frac{1}{\frac{1}{3} m_b L^2 + m_p L^2} \left[\frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2 \pi t}{T} \right)^2 \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right] \quad \dots(2.42)$$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini untuk mencapai tujuan yang diinginkan, harus dilakukan dalam beberapa tahapan. Adapun tahapan tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

1.1 Studi Literatur

Langkah pertama yang dilakukan sebelum melakukan penelitian adalah studi literatur. Studi literatur adalah mengumpulkan penelitian yang terdahulu yang terbaru, kemudian merumuskan permasalahan yang ada dan mencari solusi

dengan mengumpulkan literatur penelitian terbaru serta teori yang terkait dengan permasalahan yang ada.

Dalam tahap studi literatur ini dikumpulkan penelitian yang telah dilakukan dan dasar-dasar teori yang berkaitan dengan topik pemanfaatan energi gelombang laut dan mekanisme *energy harvesting*, baik dari jurnal, artikel, *text book*, *handbook* dan lain-lain.

1.2 Identifikasi masalah

Setelah melakukan studi literatur, masalah yang dapat diidentifikasi adalah jika mekanisme PLTGL diberikan input berupa energi gelombang laut, maka akan dihasilkan output berupa energi listrik dalam bentuk voltase. Untuk mengetahui besarnya energi yang dihasilkan, maka dalam penelitian ini dilakukan variasi pada parameter komponen PLTGL yaitu variasi panjang lengan pengungkit, massa pelampung dan panjang pelampung. Adapun parameter komponen PLTGL seperti pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Parameter Komponen PLTGL

No	Nama Komponen	Parameter
1.	Rasio Gearbox	1:12
2.	Panjang Lengan	0,5 m
3.	Panjang Pelampung	0.30 m
4.	Massa Pelampung	0.35 kg

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Maris [23] diketahui bahwa daya pada yang dihasilkan oleh kolam uji sebesar 3,609 Watt. Dengan membandingkan antara perhitungan gelombang air laut pada kondisi sebenarnya di lapangan yaitu sebesar 0,06 kW sampai 64 kW [2], maka disimpulkan bahwa penulis menggunakan perbandingan skala dengan aturan perhitungan sebagai berikut:

$$Skala\ model = \frac{daya\ pada\ kondisi\ laut\ sebenarnya}{daya\ kolam\ pengujian\ protitipe}$$

$$\frac{60\ w}{3,609\ w} = 17$$

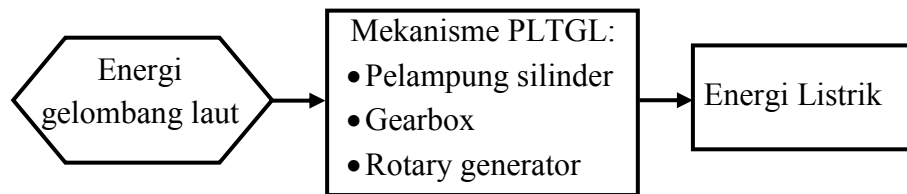
Sehingga skala yang akan dibuat adalah 1:17 untuk mendapatkan hasil daya yang maksimal jika dipasang di laut bebas. Setelah didapat daya ombak yang

masuk ke PLTGL dan efisiensi PLTGL, selanjutnya akan dihitung daya listrik yang dihasilkan mekanisme PLTGL jika dibuat secara real.

$$P_{real} = Skala\ model \times \eta_{model} \times P_{out\ mekanisme}$$

1.3 Desain Konsep Mekanisme PLTGL Metode Pelampung Silinder

Desain konsep mekanisme dari Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) ditunjukkan oleh gambar 3.2 dibawah ini:

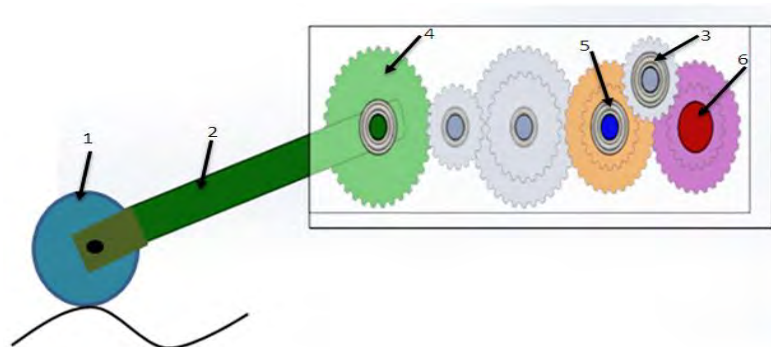


Gambar 3.2 Desain Konsep PLTGL Dengan *Rotary Generator*

Pada blok desain dapat dijelaskan bahwa untuk menghasilkan energi listrik diperlukan beberapa mekanisme. Dalam mekanisme PLTGL terdapat komponen penting yaitu lengan pengungkit dan pelampung yang dapat menghasilkan kecepatan sudut dan torsi ketika diberikan input berupa energi gelombang laut. Kecepatan sudut dan torsi yang dihasilkan lengan pengungkit akan diteruskan ke mekanisme gearbox. Rasio putaran *gearbox* adalah 1:5 dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar putaran yang akan diteruskan ke generator. Torsi yang dihasilkan *gearbox* akan digunakan untuk memutar generator. Generator akan menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus dan voltase.

1. Cara Kerja Mekanisme PLTG

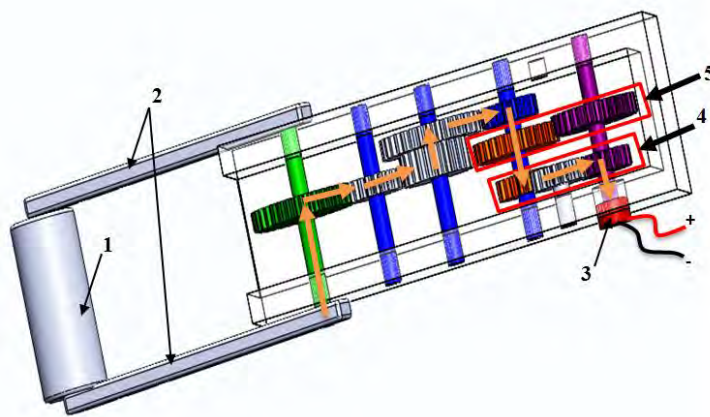
Rancangan dari pengembangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut ditunjukkan pada Gambar 3.3 dibawah ini:



Gambar 3.3 Pandangan Samping Skema Mekanisme PLTGL

Keterangan:

- 1 = Pelampung
- 2 = Lengan
- 3 = Bearing
- 4 = Roda gigi input
- 5 = One way bearing
- 6 = Generator

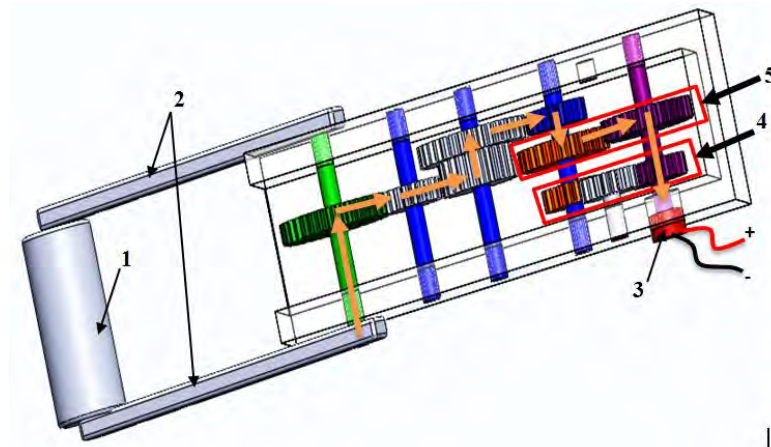


Gambar 3.4 Pelampung Bergerak Keatas

Keterangan:

- 1 = Pelampung
- 2 = Lengan pengungkit
- 3 = Generator
- 4 = Gearbox pada saat pelampung bergerak naik
- 5 = Gearbox pada saat bergerak turun

Prinsip kerja alat adalah pada saat lengan bergerak ke atas karena pengaruh gelombang air laut maka gaya yang dihasilkan oleh lengan akan dilanjutkan ke gearbox dan dilanjutkan ke gearbox 4. Torsi hanya bisa lewat pada sistem gearbox 4 sedangkan pada sistem gearbox roda gigi terlepas karena terdapat *one way bearing*. Putaran sistem gearbox 4 diteruskan ke generator melalui spur gear. Generator berputar dengan kecepatan sudut lima kali lebih besar dari kecepatan sudut putaran roda gigi input.

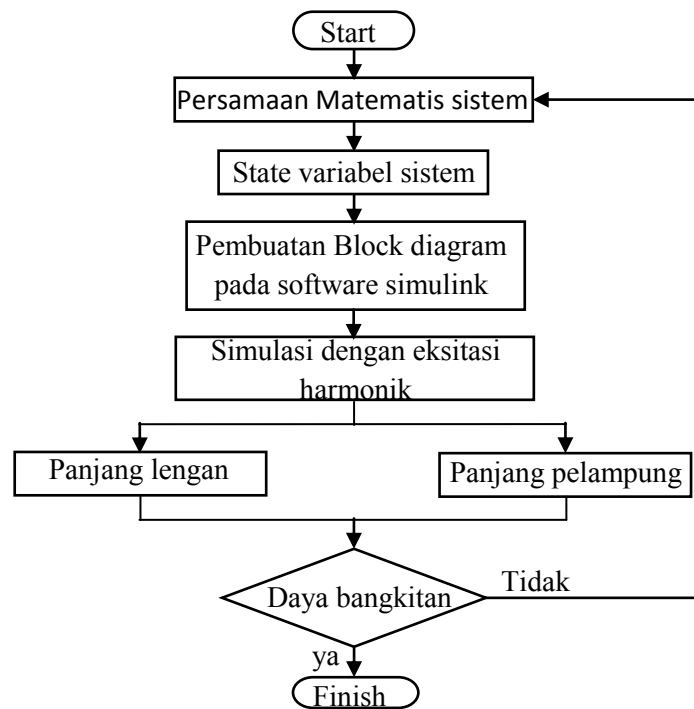


Gambar 3.5 Pelampung Bergerak Kebawah

Pada saat lengan bergerak ke bawah akibat berat lengan dan pelampung, gaya diteruskan ke gearbox dan dilanjutkan ke gearbox 5. Torsi hanya bisa lewat ke sistem *gerbox* 5, sedangkan pada sistem gearbox 4 netral karena dipasang sebuah *one way bearing*. Dari sistem gearbox 5 diteruskan kegenerator melalui spur gear. Penggunaan mekanisme *one way bearing* bertujuan untuk mengontrol putaran gearbox pada saat lengan bergerak ke atas maupun ke bawah, sehingga generator tetap berputar pada satu arah dan kontinu.

1.3.1 Simulasi Karakteristik Model PLTGL

Pada simulasi dan pemodelan PLTGL ini dilakukan dengan metode *state-variabel* dimana akan dilakukan dalam beberapa tahapan. Diagram alir pengujian karakteristik PLTGL dengan numerik ditampilkan pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Diagram Alir Karakteristik Model PLTGL

1. Penyederhanaan model fisik sistem

Untuk mempermudah proses analisa maka terlebih dahulu perlu dilakukan penyederhanaan dari bentuk fisik PLTGL, seperti pada Lampiran 1 sistem PLTGL ini terdiri dari sebuah pelampung dengan massa (m_p), massa lengan (m_l), gearbox dan mekanisme generator

2. Penurunan persamaan gerak

Persamaan gerak dari sistem diturunkan terlebih dahulu dengan membangun *free body diagram* dari model fisik sistem yang telah tersederhanakan. Berdasarkan *free body diagram* yang telah dibentuk setiap komponen gaya dijumlahkan dengan menggunakan hukum newton untuk gerak rotasi dari PLTGL. Persamaan gerak sistem merupakan persamaan dengan ordo dua. Persamaan *state variable* diperoleh dengan cara merubah bentuk persamaan gerak yang telah diperoleh ke dalam persamaan differensial dengan ordo satu, persamaan state-variabel dapat dilihat pada Lampiran 1.

3. Pembuatan *block diagram* simulasi

Dari hasil persamaan gerak dan *state-variabel* yang sudah dibuat maka akan dibuat *block simulink* pada *mathlab simulink*. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan matematis dari PLTGL melalui metode *state space*. Ketika proses eksekusi simulasi, input yang digunakan berupa sinusoidal (harmonik) yang dihasilkan gelombang laut.

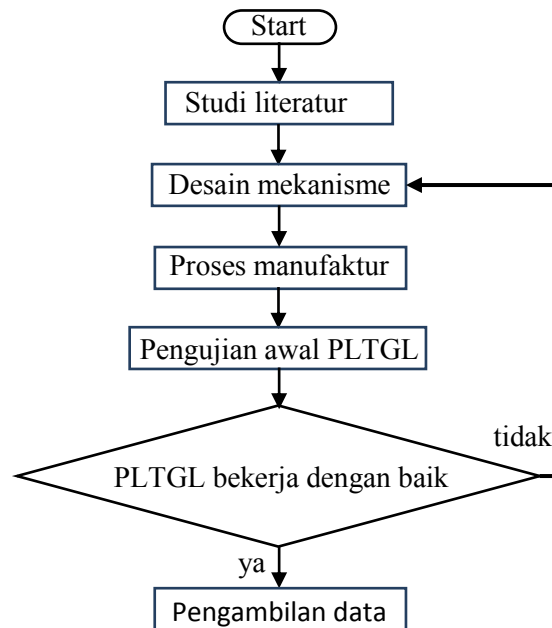
Pada simulasi sistem didapatkan grafik 2D untuk tujuan validasi dan untuk mendapatkan hubungan antara panjang lengan, panjang pelampung dan massa pelampung terhadap voltase maksimal yang dapat dibangkitkan.

Pekerjaan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menggambar dengan komputer, didapatkan variabel-variabel pendukung simulasi seperti inersia lengan pengungkit, inersia roda gigi dan lain sebagainya.
2. Tahap pemodelan Matematis PLTG, dilakukan penyusunan *state variabel* untuk sistem lengan 1 derajat kebebasan ditambah sistem gearbox dan generator.
3. Menyusun blok diagram dalam software numerik.
4. Simulasi sistem untuk input gelombang harmonik, dari tahap ini didapatkan grafik respon sistem. Untuk input gelombang harmonik akan disusun grafik:
 - a. Posisi - waktu
 - b. Kecepatan - waktu
 - c. Akselerasi - waktu
 - d. Energi – waktu
5. Tahap Analisis, tiap-tiap grafik akan dibandingkan dengan pengujian dengan dikolam uji pada hasil eksperimen.
6. Penarikan Kesimpulan.

1.3.2 Rancang Bangun Mekanisme PLTGL

Diagram alir perancangan PLTGL yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.7 dibawah ini:



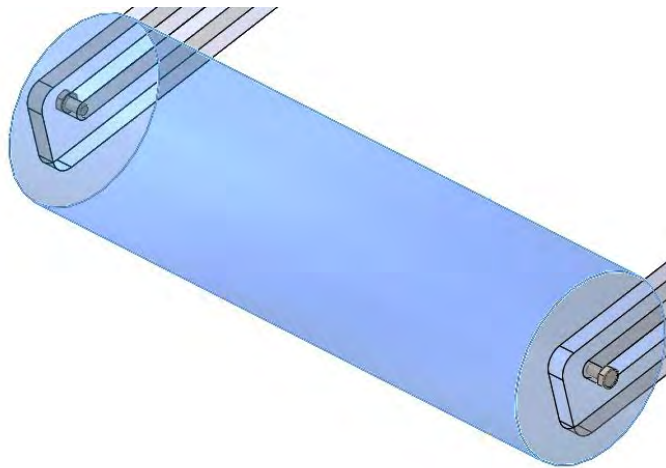
Gambar 3.7 Diagram Alir Perancangan PLTGL

Energi yang dihasilkan dari gelombang laut yang merambat melalui medium air laut dapat dibangkitkan dengan prototype mekanisme PLTGL. Dalam penelitian ini, untuk mengoptimalkan energi yang dihasilkan oleh sistem PLTGL maka divariasi dimensi pelampung dan panjang lengannya. Untuk mencari besarnya energi yang dapat dihasilkan dengan memvariasi dimensi tersebut, maka perlu diketahui hubungan energi yang dihasilkan dengan variasi pelampung dan lengan.

Komponen-Komponen Mekanis PLTGL

1. Pelampung (*Floater*)

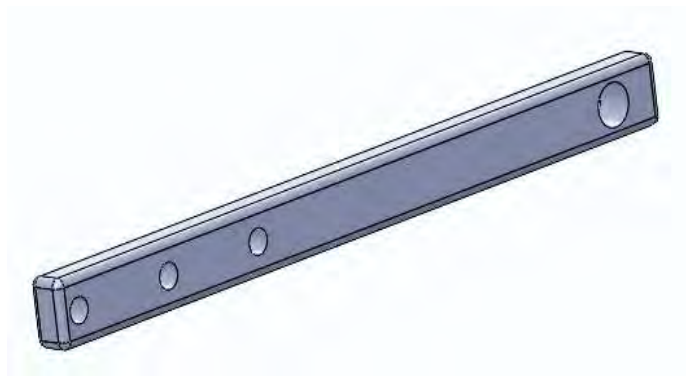
Pelampung berfungsi untuk menggerakkan lengan pelampung agar dapat bergerak naik turun. Pelampung dibuat dari plastik (PVC) dan memiliki ukuran diameter 9 cm dan panjang 28 cm dimana dengan ukuran seperti itu untuk menyesuaikan dengan ukuran dari prototype PLTGL yang dibuat dan besarnya kolam simulator. Rancangan pelampung ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut ini.



Gambar 3.8 Pelampung

2. Lengan dan Mekanisme

Lengan merupakan penghubung antara pelampung dengan poros penggerak gearbox. Lengan mekanisme dapat dilihat pada gambar 3.9 yang akan divariasikan panjang lengannya. Variasi panjang lengan dilakukan dengan cara menggeser posisi pelampung mendekati poros pada gearbox. Variasi panjang lengannya adalah $L_1 = 40$ cm, $L_2 = 35$ cm dan $L_3 = 30$ cm disesuaikan dengan gelombang pada kolam simulator dan besarnya prototype PLTGL yang dibuat, panjang lengan sangat mempengaruhi torsi dan putaran yang akan dihasilkan.



Gambar 3.9 Lengan Pelampung

3. Roda Gigi Lurus

Roda gigi berfungsi sebagai putaran dan pengubah kecepatan yang akan masuk ke generator. Pada *gearbox* ini di rancang dengan rasio kecepatan 1:5, dimana satu kali putaran pada roda gigi input akan menghasilkan 5 kali putaran

pada roda gigi output yang masuk ke dalam generator. Roda gigi yang dirancang berbahan plastik. Roda gigi dapat terlihat pada gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.10 Roda Gigi

4. Bearing Satu Arah

Bearing satu arah ini berfungsi sebagai bantalan roda gigi dimana *bearing* ini akan mengunci saat pelampung bergerak naik dan turun yang menyebabkan generator tetap berputar satu arah pada saat pelampung bergerak naik maupun turun. *One way bearing* di pasang pada *gearbox*.



Gambar 3.11 *Bearing* Satu Arah

5. Generator

Generator yang digunakan pada penelitian PLTGL tipe pelampung ini adalah motor DC yang putarannya dibalik dengan tipe Mabuchi RF-300FA-12350 motor (3 Volt). Spesifikasi generator yang dipakai dalam prototype PLTGL dan pada Gambar 3.12 meunjukkan sebuah motor DC yang dipakai sebagai generator

Tabel 3.2 Spesifikasi motor DC

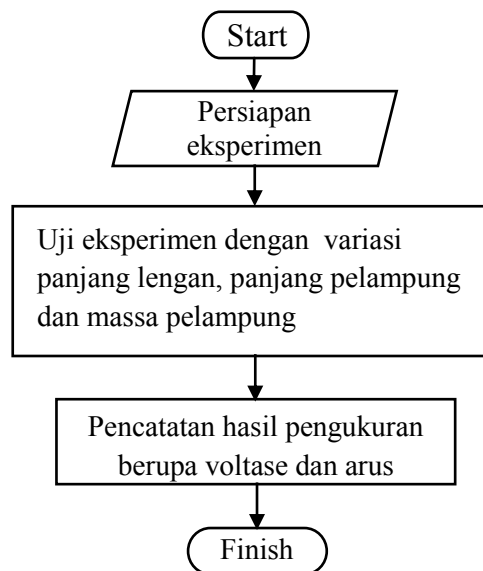
MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY					STALL		
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE		CURRENT
			r/min	A	r/min	A	mN·m	g·cm	W	mN·m	g·cm	A
RF-300FA-11420	1.7~6.0	3V CONSTANT	2900	0.017	2320	0.068	0.42	4.3	0.10	2.11	22	0.27
RF-300FA-12350	1.5~6.0	3V CONSTANT	3500	0.022	2830	0.093	0.48	4.9	0.14	2.51	26	0.39



Gambar 3.12 Generator DC

1.3.3 Pengujian Eksperimen Karakteristik PLTGL

Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan memvariasi panjang lengan, panjang pelampung dan massa pelampung pada mekanisme PLTGL yang akan digunakan untuk proses validasi serta untuk mengetahui pengaruh hubungan input output antara energi dari gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan dalam bentuk voltase. Diagram alir untuk mempermudah dalam melakukan eksperimen mengikuti Gambar 3.13 sebagai berikut.



Gambar 3.13 Diagram Alir Pengujian Karakteristik PLTGL

Pada tahap persiapan eksperimen, peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian antara lain sebagai berikut:

1. Kolam

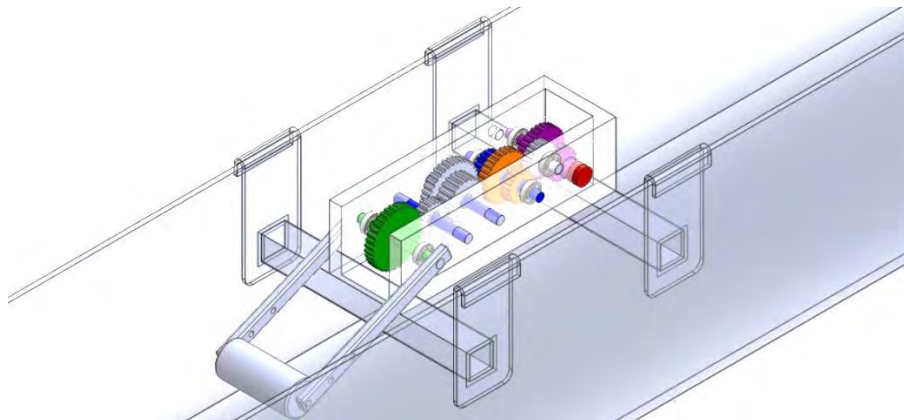
Kolam merupakan media untuk dilakukannya pengujian terhadap mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder ini dimana pada kolam tersebut dapat dihasilkan gelombang yang merupakan sumber utama dalam membangkitkan listrik melalui mekanisme yang dirancang. Dimensi kolam yang digunakan ialah 5x1x1 m.



Gambar 3.14 Kolam Pengujian

2. Mekanisme PLTGL Tipe Pelampung silinder

Dalam dilakukannya pengujian tentunya menggunakan mekanisme yang telah dirancang yakni mekanisme PLTGL Tipe pelampung silinder, dimana pada mekanisme ini terdiri atas komponen utama yakni pelampung sebagai konversi gerakan gelombang menjadi gerakan naik turun, komponen lengan pengungkit sebagai penggerak utama mekanisme yang menggerakkan *gearbox* yang turut memutar rotary generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik.



Gambar 3.15 Rancangan Mekanisme PLTGL Tipe Pelampung Silinder

3. Perekam Data dan Pengolah Data

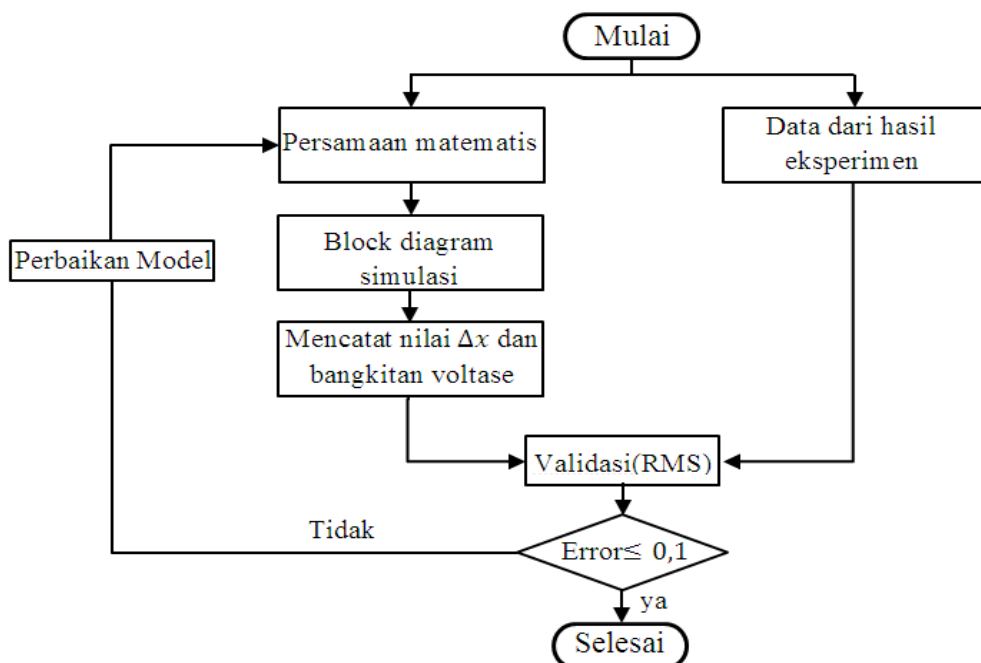
Untuk merekam data pada pengujian ini digunakan *Digital Storage Oscilloscope* dengan merk UNI-T UT2062C, keluaran dari alat ini ialah data tegangan yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder . Data tersebut berupa grafik voltase bangkitan induksi rotary generator terhadap waktu.



Gambar 3.16 Digital Storage Oscilloscope

1.3.4 Validasi Hasil Eksperimen dengan Hasil Pemodelan

Validasi hasil bertujuan untuk mendapatkan model simulasi yang mendekati kondisi yang sebenarnya. Validasi hasil simulasi terhadap hasil eksperimen yang telah dilakukan. Untuk lebih jelasnya maka dibuat tahap simulasi untuk keperluan validasi seperti Gambar 3.17 berikut.



Gambar 3.17 Diagram Alir Validasi Hasil Eksperimen dengan Hasil Pemodelan

Error yang kurang dari sama dengan 10% atau 0,1 antara model simulasi dan uji eksperimen menandakan model valid. *Error* ini tentu mengacu pada besaran yang saling dibandingkan. Agar dapat dibandingkan maka sebelumnya dilakukan RMS untuk hasil eksperimen dan pemodelan. Jika lebih dari itu maka proses diulangi dari tahap persamaan matematis. Untuk prosentase kesalahan dapat dijelaskan sebagai berikut:

Jika *error* yang terjadi terlalu besar ($\varepsilon \geq 50\%$) maka perlu ditinjau ulang model simulasi yang sudah dibuat secara keseluruhan. Sedang jika *error* relatif lebih kecil ($10\% < \varepsilon < 50\%$) maka perlu dilakukan sedikit penyesuaian pada nilai b hingga diperoleh $\varepsilon \leq 10\%$ secara *trial-error*.

1.3.5 Efisiensi sistem PLTGL

Sebelum melakukan perhitungan efisiensi maka yang dilakukan adalah mengetahui potensi daya gelombang yang mampu di rubah menjadi daya listrik mengikuti rumus di bawah ini:

$$P_w = \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) \cdot L \quad \dots(3.1)$$

Dengan:

P_w = Daya (watt).

ρ = Massa jenis air laut (kg/m^3).

H = Tinggi gelombang (m).

T = Periode gelombang (s).

L = Lebar gelombang diasumsikan sama dengan panjang pelampung (m).

Setelah mengetahui daya gelombang dan daya keluaran dari PLTGL maka Efisiensi PLTGL dapat dihitung dengan perbandingan dari daya gelombang yang mengenai pelampung dengan daya yang keluar dari PLTGL.

$$\eta_{PLTGL} = \frac{P_{output}}{P_w} \times 100\% \quad \dots(3.2)$$

Keterangan:

η_{PLTGL} = Efisiensi dari sistem (%).

P_w = Daya input yang dihasilkan gelombang simulator (watt).

P_{output} = Daya yang dihasilkan mekanisme (watt).

Nilai efisiensi ini yang menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi sistem PLTGL. Efisiensi dari sistem bergantung pada besarnya gelombang dari laut dan yang lebih penting lagi adalah kualitas kerja sistem PLTGL.

1.3.6 Analisa Hasil

Dari data yang diperoleh pada hasil pengujian PLTGL tipe pelampung silinder akan diolah sehingga hasil pengujian akan ditampilkan dalam bentuk grafik 2D. Grafik yang ditampilkan berupa grafikangkitan daya, energi dan arus. Setelah itu grafik akan dianalisa dan diterjemahkan dan disimpulkan.

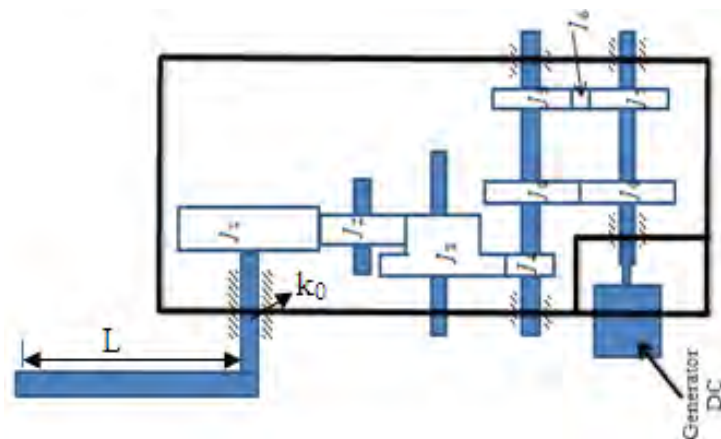
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Matematis PLTGL dengan Pelampung Silinder

Pemodelan matematis PLTG menggunakan 5 derajat kebebasan, 1 derajat kebebasan pada lengan pengungkit, 3 derajat kebebasan pada gearbox dan 1 derajat kebebasan pada rotary generator, seperti yang diilustrasikan pada gambar 4.1 dibawah ini.

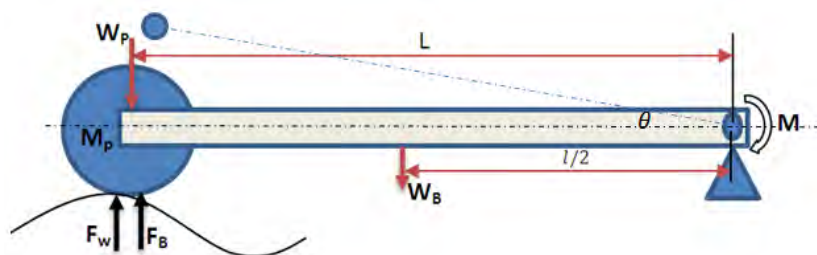


Gambar 4. 1 Model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

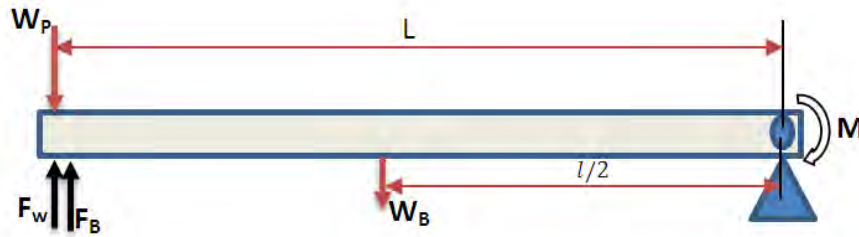
Dari gambar pemodelan diatas dapat dibuat free body diagram sebagai berikut:

4.1.1 Pemodelan Matematis pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Free body diagram pengungkit dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut ditampilkan pada gambar 4.2 berikut ini:



Gambar 4.2 Model Lengan pengungkit PLTGL



Gambar 4.3 Free body Lengan pengungkit PLTGL

$$\sum M = J_0 \ddot{\theta}$$

$$F_b \cdot l + F_w \cdot l - W_p(l + l \sin \theta) - W_b \left(\frac{l}{2} + \frac{l}{2} \sin \theta \right) - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta} \quad \dots(4.1)$$

Akibat dari kesetimbangan statis yang terjadi pada mekanisme maka persamaan (1.1) disubstitusikan kepersamaan (4.1). Maka menjadi:

$$F_b \cdot l + F_w \cdot l - W_p \cdot l - W_p l \sin \theta - W_b \cdot \frac{l}{2} - W_b \cdot \frac{l}{2} \sin \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta}_0$$

$$F_w \cdot l - W_p l \sin \theta - W_b \cdot \frac{l}{2} \sin \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta}_0$$

Dimana $\sin \theta = \theta$, maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + (W_p \cdot l + W_b \cdot l/2) \sin \theta + k_0(\theta_0 - \theta_1) = F_w \cdot l$$

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + (W_p \cdot l + W_b \cdot l/2) \sin \theta + k_0 \theta_0 = F_w \cdot l + k_0 \theta_1$$

Dimana J_0 adalah $\frac{1}{3} m_b L^2 + m_p L^2$, maka :

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta + k_0 \theta_0 = F_w \cdot l + k_0 \theta_1$$

$$\ddot{\theta}_0 = \frac{l}{J_0} \left[F_w \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right] \quad \dots(4.2)$$

Diketahui gaya wave adalah:

$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2 \pi t}{T} \right)^2 \quad \dots(4.3)$$

Substitusikan persamaan (1.1), dan (4.3) kepersamaan (4.2), maka diperoleh:

$$\ddot{\theta}_0 = \frac{1}{\frac{1}{3} m_b L^2 + m_p L^2} \left[\frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2 \pi t}{T} \right)^2 \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right]$$

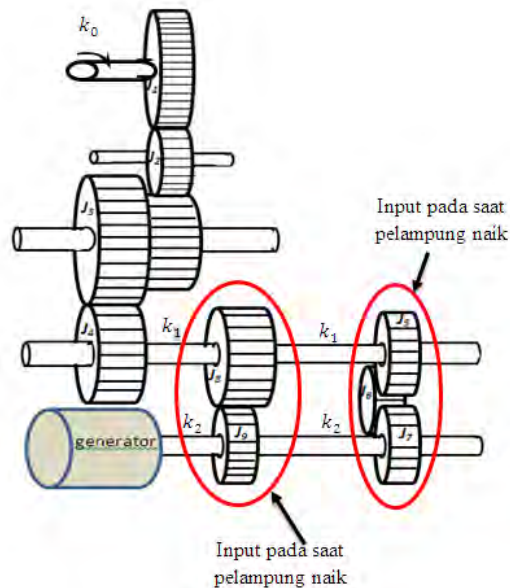
Dimana:

$$\ddot{\theta}_0 = \dot{\omega}_0$$

$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{\frac{1}{3} m_b L^2 + m_p L^2} \left[\frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2 \pi t}{T} \right)^2 \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right] \quad \dots(4.4)$$

4.1.2 Persamaan Gerak Mekanisme Gearbox

Persamaan gerak dari mekanisme gearbox terdiri dari 3 DOF dan dibuat dalam 3 state variabel, model dari gearbox seperti pada gambar 4.4 dibawah ini.



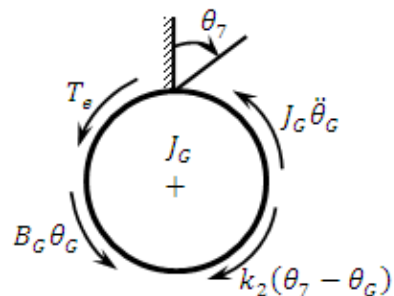
Gambar 4.4 Mekanisme Gearbox

Free body diagram mekanisme gearbox dan persamaan matematis dapat dilihat pada lampiran 1 dan lampiran 2.

4.1.3 Persamaan Gerak Rotary Generator

Persamaan gerak pada rotary generator terdiri dari 2 DOF, satu DOF untuk mekanik generator dan satu DOF untuk elektrik generator. Free body diagram dan persamaan matematis seperti pada gambar 4.5 dibawah ini:

$$\begin{aligned}\Sigma M &= J_G \ddot{\theta}_G \\ J_G \ddot{\theta}_G + B_G \dot{\theta}_G + T_e - k_2(\theta_7 - \theta_G) &= 0 \\ J_G \ddot{\theta}_G + B_G \dot{\theta}_G + T_e + k_2\theta_7 - k_2\theta_G &= 0 \\ \dot{\theta}_G &= \frac{1}{J_G} [-B_G \dot{\theta}_G - T_e - k_2\theta_G + k_2\theta_7]\end{aligned}$$



Gambar 4.5 FBD Mekanik Generator

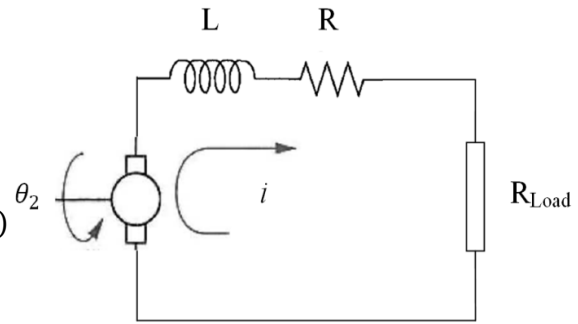
Torsi generator $T_e = (2.N.B.l.r)i$

Asumsi polaritas em

$$e_m = e(t) = (2.N.B.l.r)\dot{\theta}$$

$$L \frac{di}{dt} + R_i + R_{load}i = 2.N.B.l.r = e(t)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [-R_i + (2.N.B.l.r)\dot{\theta}_i]$$



Gambar 4.6 FBD Elektrik Generator

4.1.4 Parameter Hasil Desain Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Data parameter dari sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut sesuai dengan hasil perhitungan dan geometri hasil rancang bangun, data inilah nantinya akan diolah dengan simulink matlab hingga akan keluar nilai-nilai output yang diinginkan. data parameter gelombang laut pada kolom simulator ditampilkan pada tabel 4.1 dan perhitungan kekakuan poros menggunakan persamaan (2.22) dan perhitungan inersia menggunakan persamaan (2.21). data hasil perhitungan kekakuan poros dan inersia gearbox ditampilkan pada tabel 4.2 dan 4.3 berikut ini.

Tabel 4.1 data parameter gelombang pada kolam simulator

Model parameter	Simbul (unit)	Nilai parameter
Tinggi gelombang	H (m)	0,11
Periode gelombang	T (s)	1
Frekuensi	f (Hz)	1, 2 dan 3
Massa jenis	ρ (kg/m ³)	1000
Percepatan grafitasi	g (kg.m/s ²)	9,8

Tabel 4. 2 Perhitungan kekakuan poros

Poros	L(m)	D(m)	G (N/m ²)	K(Nm/rad)
Poros 1	0,05	0,02	6,60E+10	22830
Poros 2	0,043	0,02	6,60E+10	122005
Poros 3	0,043	0,02	6,60E+10	122005

Tabel 4. 3 Perhitungan Momen inersia

Roda gigi	Jari-Jari (m)	Massa (kg)	Momen Inersia (kg.m ²)
Gear 1	0.035	0.0312	1.9110e-04
Gear 2	0.02	0.0056	1.1200e-05
Gear 3	0.009	0.0083	3.3615e-06
Gear 4	0.020	0.0111	2.2200e-05
Gear 5	0.025	0.011	3.4375e-05
Gear 6	0.025	0.01	3.1250e-05
Gear 7	0.027	0.01	3.6450e-05
Gear 8	0.025	0.01	3.1250e-05
Gear 9	0.032	0.01	5.1200e-05
Generator	0.08	0.92	2.9707E-03

Berikut ditampilkan tabel 4.3 parameter keseluruhan dari komponen mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

Tabel 4.3 Parameter sistem Mekanisme PLTGL

Model parameter	Simbol (unit)	Nilai Parameter
Massa pelampung	M (kg)	0.3333
Massa lengan pengungkit	M (kg)	0.1658
Panjang Pelampung	Pp (m)	30
Panjang lengan pengungkit	Pl (m)	50
Momen inersia batang	Jb (N.m s ² /rad)	0.0491
Momen inersia gear 1	J ₁ (N.m s ² /rad)	1.9110e-04
Momen inersia gear 2	J ₂ (N.m s ² /rad)	1.1200e-05
Momen inersia gear 3	J ₃ (N.m s ² /rad)	3.3615e-06
Momen inersia gear 4	J ₄ (N.m s ² /rad)	2.2200e-05
Momen inersia gear 5	J ₅ (N.m s ² /rad)	3.4375e-05
Momen inersia gear 6	J ₆ (N.m s ² /rad)	3.1250e-05
Momen inersia gear 7	J ₇ (N.m s ² /rad)	3.6450e-05
Momen inersia gear 8	J ₈ (N.m s ² /rad)	3.1250e-05
Momen inersia gear 9	J ₉ (N.m s ² /rad)	5.1200e-05

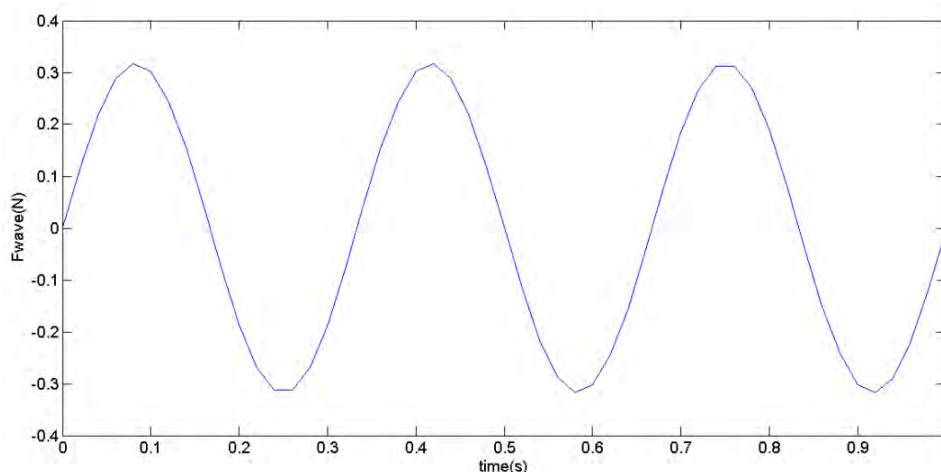
Momen inersia generator	$J_g(\text{N.m s}^2/\text{rad})$	2.9707E-03
Konstanta kekakuan poros 1	$K_{t0}(\text{N.m/rad})$	22830
Konstanta kekakuan poros 2	$K_{t1}(\text{N.m/rad})$	122005
Konstanta kekakuan poros 3	$K_{t2}(\text{N.m/rad})$	122005
Jumlah lilitan	N	2500
Kuan medan	B (wm/m^2)	1
Induktansi	L	0.15
Hambatan listrik generator	R (ohm)	1

4.2 Pemodelan pada Simulink Matlab

Setelah membuat pemodelan matematis, dari persamaan matematis maka didapat persamaan gerak yang selanjutnya diterjemahkan pada block simulink, inputan yang digunakan berupa gaya gelombang laut dengan frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz. Simulasi yang dilakukan juga divariasikan dimensi lengan dan dimensi pelampung. Hal ini bertujuan untuk melihat pengaruh energi yang dihasilkan PLTGL tipe pelampung silinder.

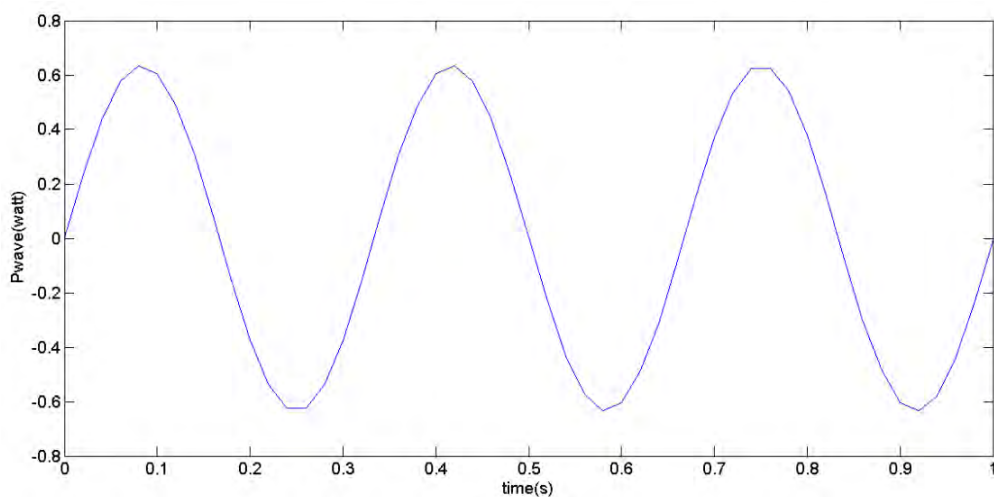
4.2.1 Pemodelan inputan gelombang laut

Eksitasi atau inputan yang diberikan pada simulasi ini sesuai dengan eksitasi pada eksperimen, dimana sesuai dengan keadaan gelombang laut, gaya wave yang diinputkan berupa sinusoidal. Berikut ditampilkan pada gambar 4.7 Bentuk dari gelombang laut.



Gambar 4.7 Grafik eksitasi yang diberikan berupa sinusoidal

Sedangkan daya yang dihasilkan gelombang pada kolam simulator yang digunakan sebagai inputan pada simulasi ini seperti pada gambar 4.8 di bawah ini:

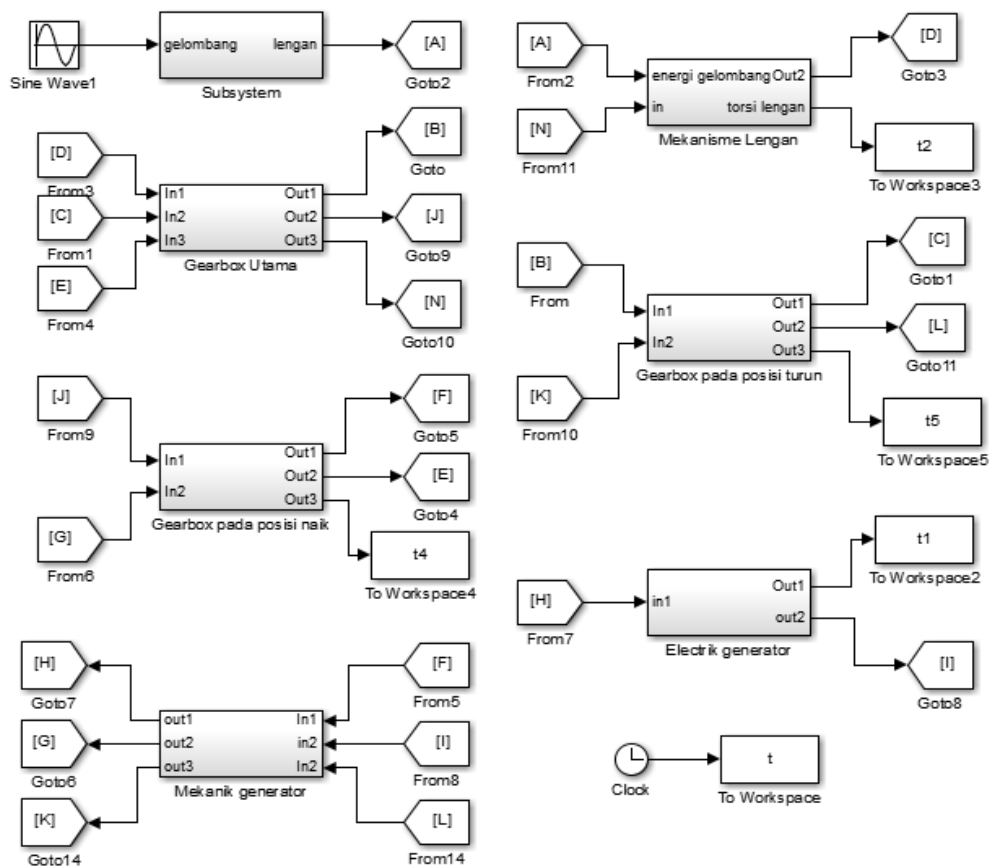


Gambar 4.8 Grafik daya gelombang pada kolam simulator

Dari gambar 4.8 di atas daya yang dihasilkan pada kolam simulator yang digunakan dalam simulasi ini yaitu sebesar 0.4455 watt. Dari daya tersebut diteruskan ke lengan pengungkit yang digunakan untuk menggerakkan gear box.

4.2.2 Pemodelan Time Respon Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Setelah menentukan inputan yang digunakan, maka dilakukan pembuatan block diagram pada simulink matlab, seperti pada gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.9 Block simulasi pada matlab

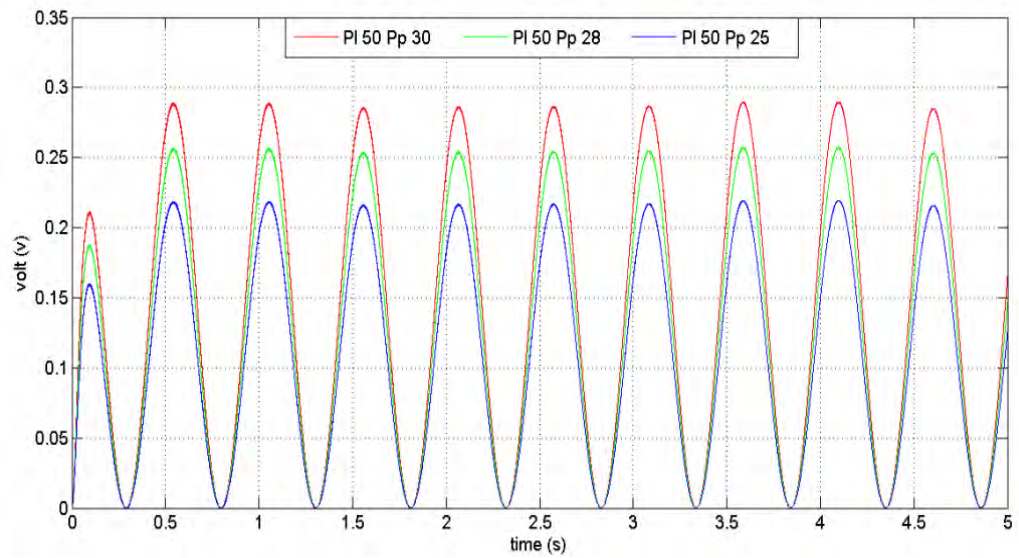
4.3 Hasil Simulasi dan Analisa Berupa Energi Bangkitan pada Pemodelan Time Respon

Pada simulasi ini didapatkan respon gelombang laut dan energi bangkitan dari mekanisme PLTGL, gaya yang digunakan pada pemodelan ini berupa sinusoidal dari gelombang laut, frekuensi dari gelombang air laut yang digunakan pada inputan ini adalah 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz. Untuk variasi dari lengan adalah 50 cm, 40 cm dan 30 cm. variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

4.3.1 Energi yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung pada frekuensi 1 Hz

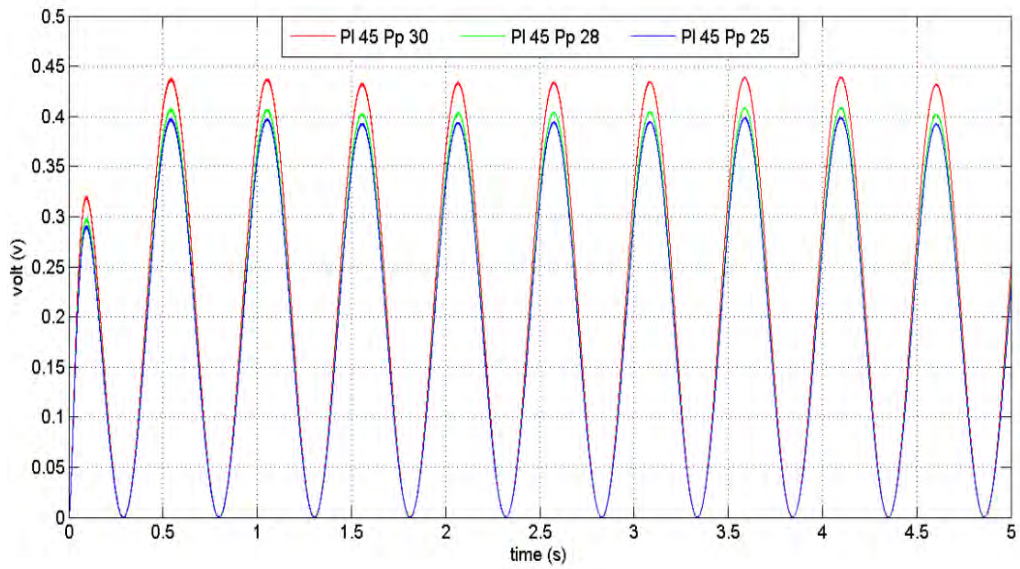
Variasi panjang lengan 50 cm, 45 cm, 30 cm dan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm, 25 cm pada frekuensi 1 Hz. Pengaruh panjang pelampung dan panjang lengan terhadap energi listrik yang dihasilkan, besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada grafik dibawah ini.

1. Panjang lengan 50 cm



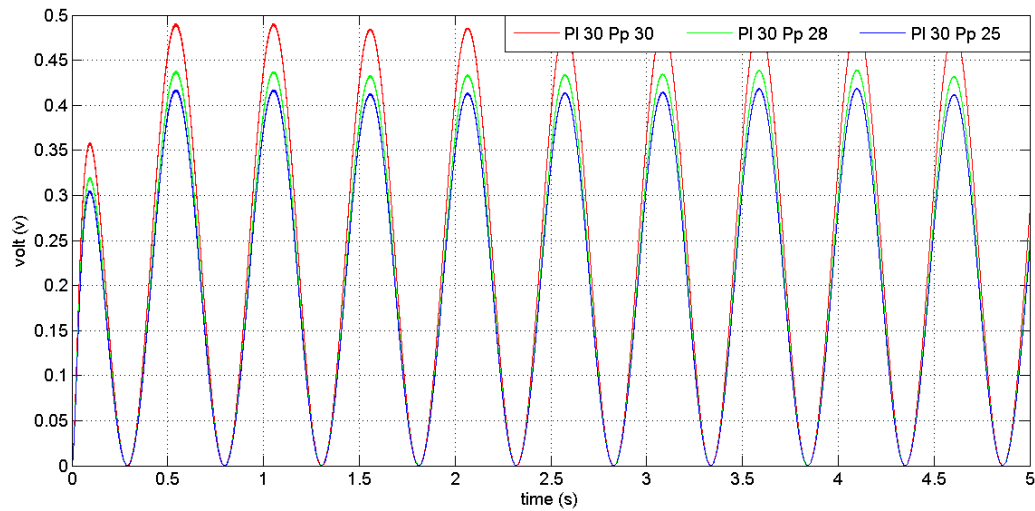
Gambar 4.10 Grafik respon energi yang dihasilkan pada PI 50 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

2. Panjang lengan 45 cm



Gambar 4.11 Grafik respon energi yang dihasilkan pada PI 45 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm

3. Panjang lengan 30 cm



Gambar 4.12 Grafik respon energi yang dihasilkan pada Pl 30 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

Dari gambar 4.10 sampai gambar 4.12 terlihat bahwa perbedaan daya yang dihasilkan pada perubahan panjang lengan dan panjang pelampung sangat signifikan, masing-masing RMS tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Hasil simulasi pada frekuensi 1 Hz

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Hasil Simulasi (volt)
1 Hz	50	30	0.1917
		28	0.1555
		25	0.1300
	45	30	0.2501
		28	0.2422
		25	0.2063
	30	30	0.2916
		28	0.2601
		25	0.2481

Pada tabel 4.4 diatas tegangan maksimal dihasilkan pada panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 30 cm dengan RMS daya yang di hasilkan 0.2916 volt. Perubahan hasil bangkitan tersebut sangat dipengaruhi oleh panjang lengan pengungkit dan luasan dari pelampung. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh panjang lengan, panjang pelampung terhadap energi listrik yang

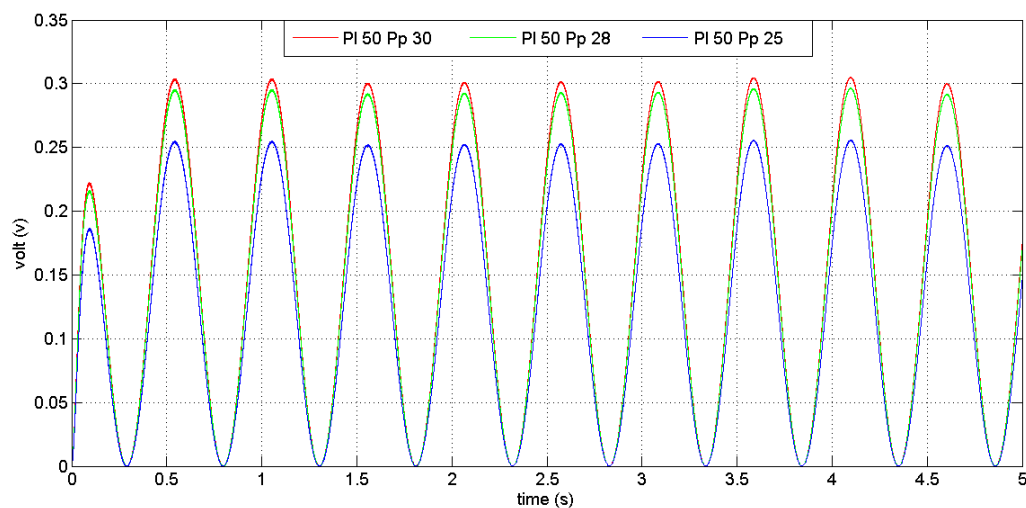
dihasilkan. Perubahan panjang lengan sangat berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan, semakin kecil torsi yang dihasilkan maka kecepatan yang dihasilkan gear box semakin besar.

Begitu juga pada luas permukaan pelampung sangat berpengaruh terhadap energi yang dihasil, dari grafik diatas dapat terlihat semakin panjang pelampung maka energi bangkitannya semakin besar, semua itu di akibatkan semakin luas permukaan pelampung maka gaya angkat yang dihasilkan semakin besar.

4.3.2 Energi yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung pada frekuensi 2 Hz

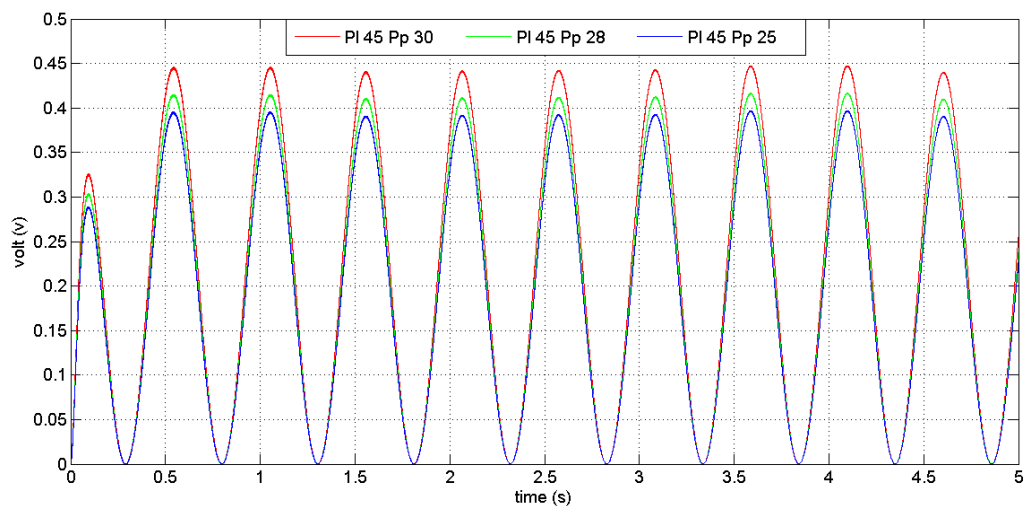
Pada frekuensi 2 Hz dengan variasi panjang lengan 50 cm, 45 cm dan 30 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm. Besarnya energi yang diperoleh di tampilkan pada grafik berikut ini:

1. Panjang lengan 50 cm



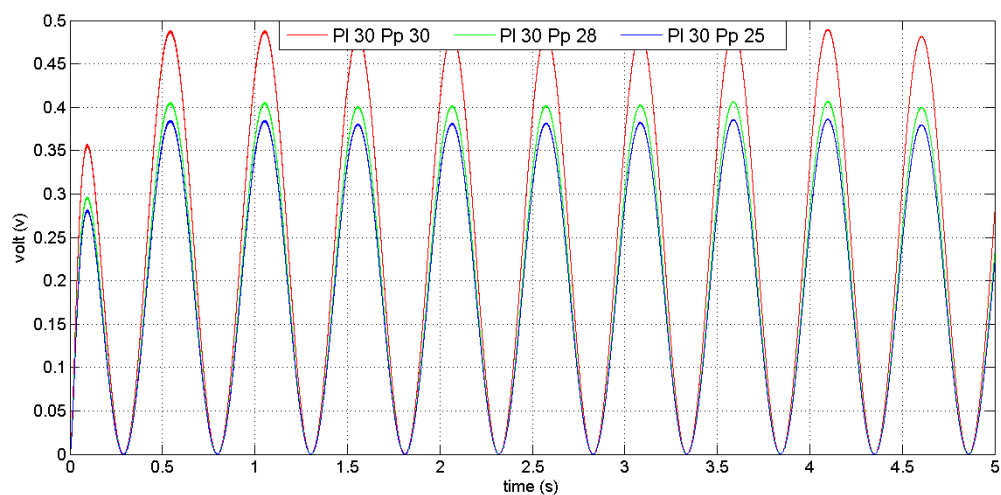
Gambar 4.13 Grafik respon energi yang dihasilkan pada Pl 50 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

2. Panjang lengan 45 cm



Gambar 4.14 Grafik respon energi yang dihasilkan pada Pl 45 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

3. Panjang lengan 30 cm



Gambar 4.15 Grafik respon energi yang dihasilkan pada Pl 30 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

Dari gambar 4.13 sampai gambar 4.15 terlihat bahwa perbedaan energi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh variasi panjang lengan dan variasi panjang pelampung. Masing-masing rms tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Hasil simulasi pada frekuensi 2 Hz

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Hasil Simulasi (volt)
2 Hz	50	30	0.1807
		28	0.1757
		25	0.1515
	45	30	0.2651
		28	0.2469
		25	0.2352
	30	30	0.2901
		28	0.2410
		25	0.2289

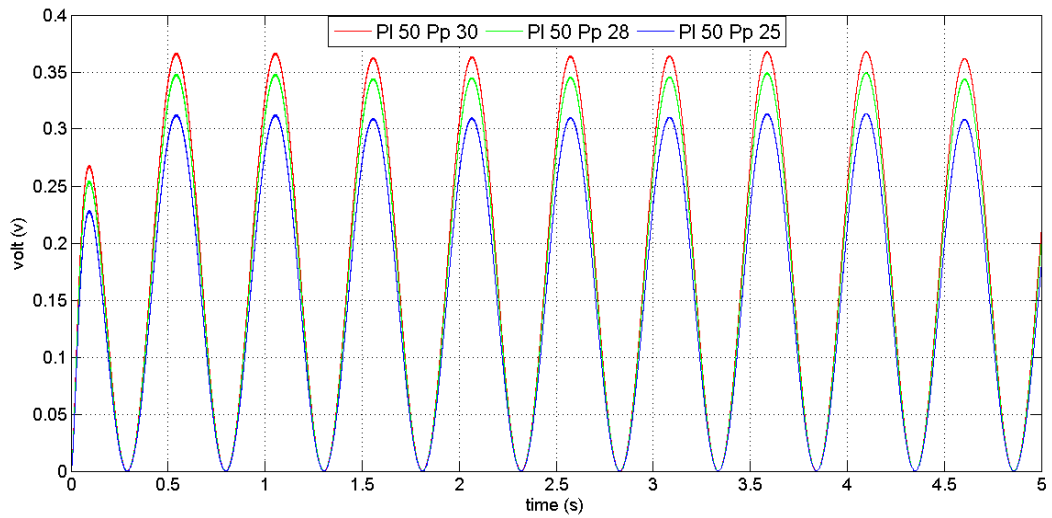
Dari tabel 4.5 diatas pada frekuensi 2 Hz energi maksimal dihasilkan pada panjang pelampung 30 cm dan panjang lengan 30 cm sebesar 0.2901 volt Sedangkan energi minimal dihasilkan pada panjang lengan 50 cm, panjang pelampung 25 cm sebesar 0.1515 volt.

Panjang lengan dan panjang pelampung sangat berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan, seperti terlihat pada gambar di atas semakin panjang pelampung energi yang dihasilkan semakin besar. Luas permukaan pelampung berpengaruh terhadap gaya angkat yang mampu dimanfaatkan untuk menggerakkan lengan pengungkit, sedangkan panjang lengan pengungkit sangat berpengaruh terhadap besar kecilnya torsi yang dihasilkan.

4.3.3 Energi yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung pada frekuensi 3 Hz

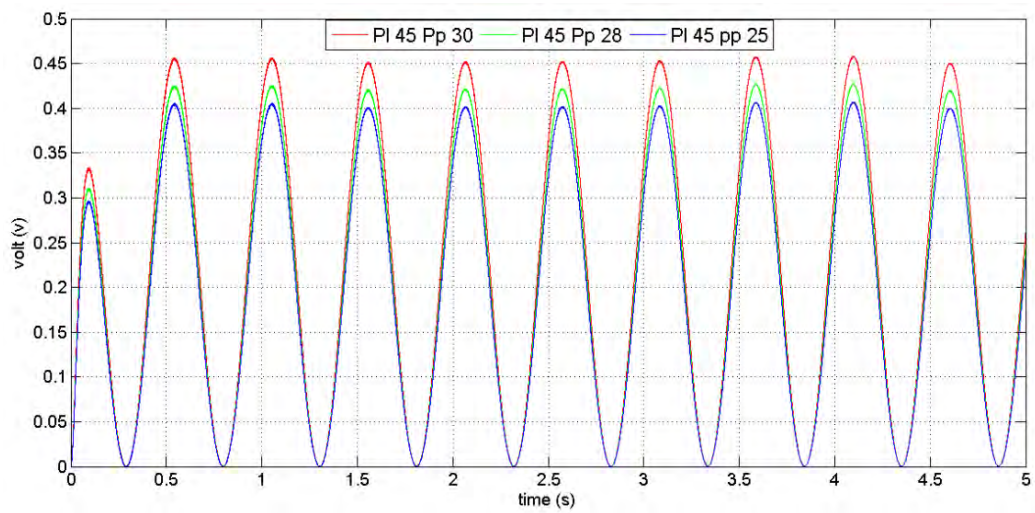
Pada frekuensi 3 Hz dengan variasi panjang lengan 50 cm, 45 cm dan 30 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm. Besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada grafik berikut ini:

1. Panjang lengan 50 cm



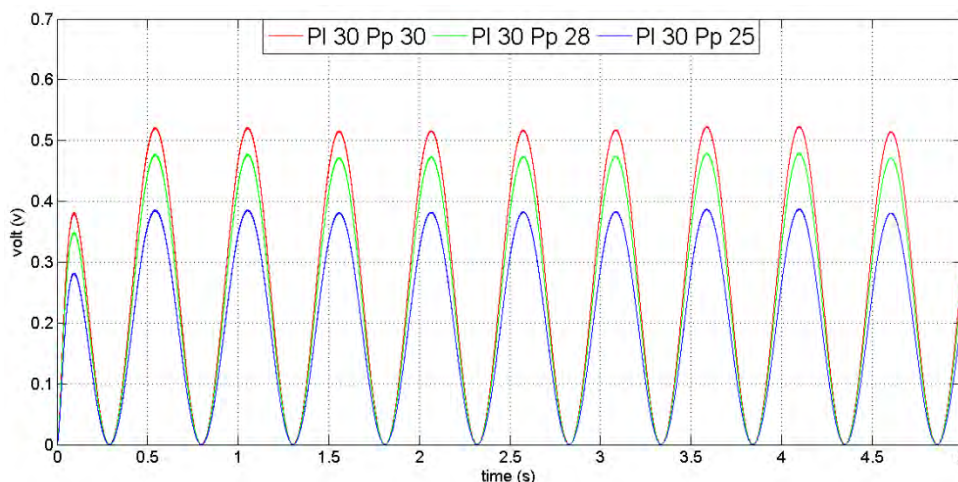
Gambar 4.16 Grafik respon energi yang dihasilkan pada Pl 50 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

2. Panjang lengan 45 cm



Gambar 4.17 Grafik respon energi yang dihasilkan pada Pl 45 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

3. Panjang lengan 30 cm



Gambar 4.18 Grafik respon energi yang dihasilkan pada PI 30 cm terhadap Pp 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

Dari gambar 4.16 sampai gambar 4.18 terlihat bahwa besarnya energi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh panjang lengan dan panjang pelampung, panjang lengan sangat berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan. Sedangkan panjang pelampung sangat berpengaruh terhadap daya apung yang dihasilkan oleh pelampung tersebut. Besar energi yang dihasilkan terhadap variasi lengan dan pelampung pada frekuensi 3 Hz disajikan pada tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Hasil simulasi pada frekuensi 3 Hz

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Hasil Simulasi (volt)
3 Hz	50	30	0.2181
		28	0.2071
		25	0.1859
	45	30	0.2710
		28	0.2529
		25	0.2410
	30	30	0.3099
		28	0.2838
		25	0.2494

Dari tabel 4.6 diatas energi yang dihasilkan tersebut terlihat bahwa semakin panjang lengan maka energi yang dihasilkan semakin kecil, semua itu disebabkan semakin panjang lengan maka torsi yang dihasilkan semakin kecil dan pergerakan lengan akan semakin kecil.

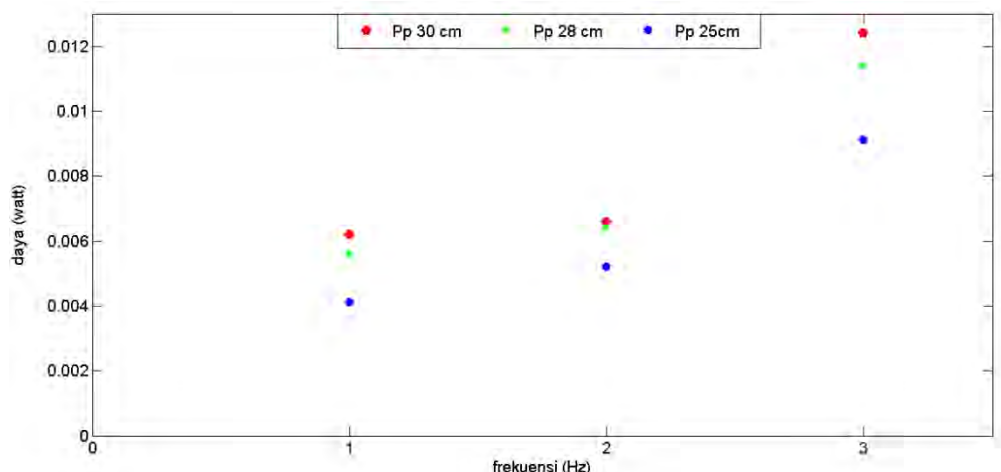
Sedangkan semakin panjang pelampung maka energi yang dihasilkan semakin besar, semua itu disebabkan semakin luas permukaan pelampung maka daya angkat dari gelombang yang mampu ditangkap oleh pelampung akan semakin besar dan daya apung dari pelampung juga semakin besar. Energi maksimal pada variasi lengan dan pelampung ini diperoleh sebesar 0.3099 volt pada panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 30 cm, sedangkan energi minimal diperoleh sebesar 0.1859 volt pada panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 25 cm.

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa semakin besar frekuensi, semakin panjang pelampung dan semakin pendek lengan menghasilkan energi yang paling maksimal, dimana energi maksimal dihasilkan pada panjang lengan 30 cm panjang pelampung 30 cm dan frekuensi 3 Hz yaitu sebesar 0.3099 volt.

4.3.4 Analisa daya yang hasil simulasi pengaruh frekuensi dan panjang pelampung terhadap energi yang dihasilkan

a. Panjang lengan 50 cm panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm

Hubungan panjang pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada panjang lengan 50 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz ditampilkan pada gambar 4.19 berikut ini.



Gambar 4.19 hubungan frekuensi dan panjang pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada panjang lengan 50 cm.

Dari gambar 4.19 terlihat semakin besar frekuensi besarnya daya yang dihasilkan semakin besar, hasil rsm daya yang dihasilkan pada tabel 4.7 berikut ini.

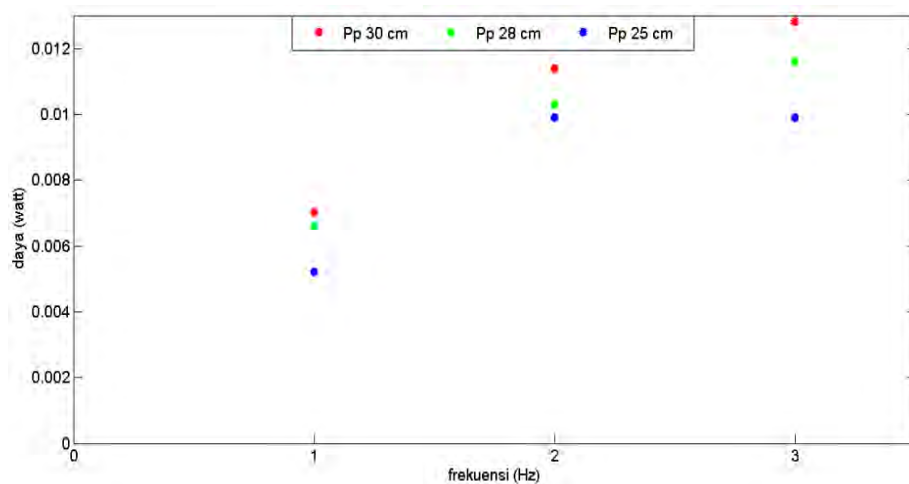
Tabel 4.7 Hasil simulasi pada panjang lengan 50 cm

Pl (cm)	Frekuensi (Hz)	Pp (cm)	P Hasil Simulasi (watt)
50 cm	1	30	0.0062
		28	0.0056
		25	0.0041
	2	30	0.0066
		28	0.0064
		25	0.0052
	3	30	0.0124
		28	0.0114
		25	0.0091

Dari tabel 4.7 diatas pada frekuensi 3 Hz dan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm menghasilkan daya bangkitan maksimum sebesar 0.0124 watt sedangkan daya minum dihasilkan pada frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 25 cm mendapat daya sebesar 0.0041 watt. Dari perubahan tersebut terlihat semakin besar frekuensi maka semakin besar daya yang dihasilkan.

b. Panjang lengan 45 cm panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm.

Hubungan panjang pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada panjang lengan 45 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz ditampilkan pada gambar 4.20 berikut.



Gambar 4.20 hubungan frekuensi dan panjang pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada panjang lengan 45 cm.

Pada gambar 4.20 diatas terlihat hubungan panjang pelampung, panjang lengan dengan perubahan frekuensi terhadap daya listrik yang dihasilkan, besarnya rms daya yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.8 berikut ini.

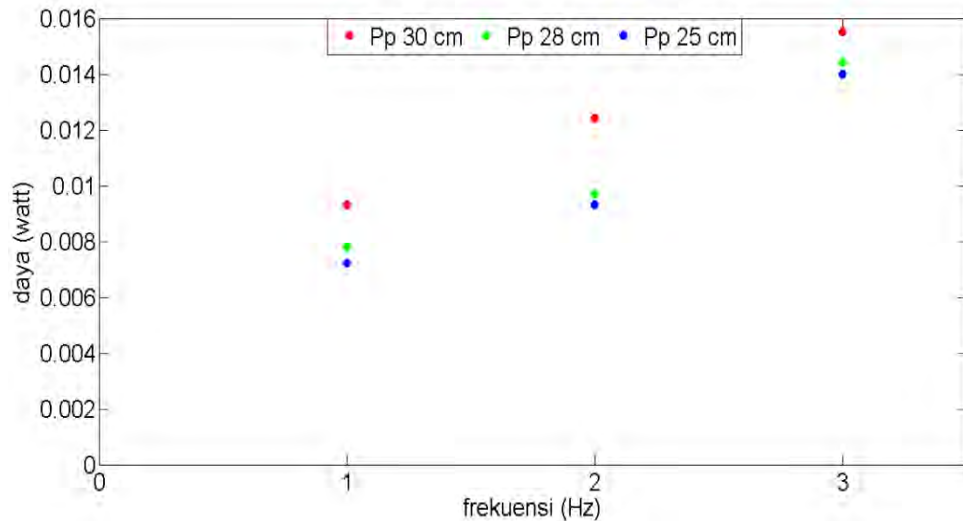
Tabel 4.8 Hasil simulasi pada panjang lengan 45 cm

Pl (cm)	Frekuensi (Hz)	Pp (cm)	P Hasil Simulasi (watt)
45 cm	1	30	0.0070
		28	0.0066
		25	0.0052
	2	30	0.0114
		28	0.0103
		25	0.0099
	3	30	0.0128
		28	0.0116
		25	0.0099

Dari tabel 4.8 diatas bahwa pada panjang pelampung pelampung 30 cm dan panjang lengan 45 cm menghasil daya maksimal pada frekuensi 3 Hz sebesar 0,0128 watt, dan daya minimal dihasilkan pada frekuensi 1 Hz dengan panjang pelampung 25 cm dan panjang lengan 45 cm sebesar 0,0052 watt.

c. Panjang lengan 30 cm variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm

Hubungan panjang pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada panjang lengan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz ditampilkan pada gambar 4.21 berikut.



Gambar 4.21 hubungan frekuensi dan panjang pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada panjang lengan 30 cm.

Pada gambar 4.21 di atas terlihat bahwa panjang pelampung mempengaruhi terhadap daya yang dihasilkan, besarnya daya yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.9 berikut ini.

Tabel 4.9 Hasil simulasi pada panjang lengan 30 cm

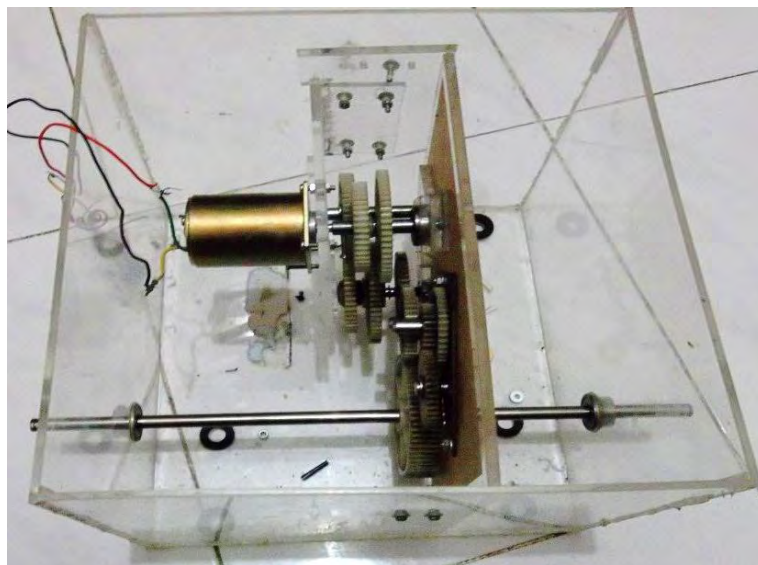
Pl (cm)	Frekuensi (Hz)	Pp (cm)	P Hasil Simulasi (watt)
30 cm	1	30	0.0093
		28	0.0078
		25	0.0072
	2	30	0.0124
		28	0.0097
		25	0.0093
	3	30	0.0155
		28	0.0144
		25	0.0140

Dari tabel 4.9 diatas bahwa daya maksimal yang dihasilkan pada panjang lengan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm dan frekuensi 3 Hz menghasilkan daya maksimal sebesar 0,0155 watt, sedangkan daya minimum

dihasilkan pada panjang pelampung 25 cm dan frekuensi 1 Hz sebesar 0,0072 watt.

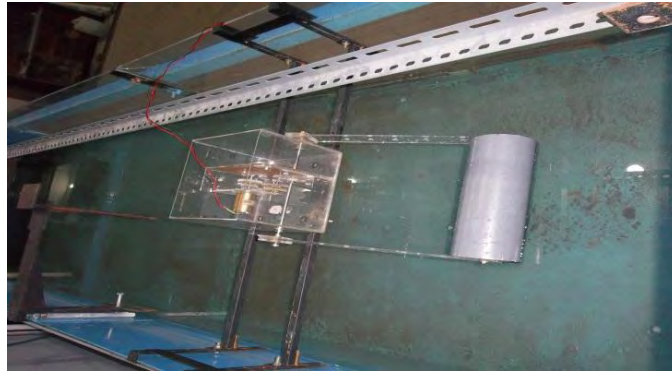
4.4 Pengujian Dinamis Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Pada tahap ini pengujian dilakukan di lab mesin vibrasi ITS, tujuan dari pengujian ini untuk mencari besar energi bangkitan yang dihasilkan PLTGL tipe pelampung silinder berupa tegangan (volt) dan Arus (A). Mekanisme yang digunakan kali ini adalah PLTGL tipe pelampung silinder. Pengujian PLTGL kali ini diuji pada kolam simulator di laboratorium vibrasi. Gambar dari alat PLTGL ditampilkan pada gambar 4.22 berikut.



Gambar 4.22 Mekanisme PLTGL sistem pelampung silinder

Inputan pada pengujian respon panjang lengan dan dimensi pelampung adalah eksitasi harmonik yang dihasilkan gelombang kolam simulator dengan frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz panjang lengan yang digunakan 50 cm, 40 cm dan 30 cm, sedangkan panjang pelampung adalah 30 cm, 28 cm dan 25 cm. Pengujian dinamis pada PLTGL tipe pelampung silinder disajikan gambar 4.23 di bawah ini.



Gambar 4.23 mekanisme PLTGL saat pengujian

Langkah pengujian dinamis PLTGL tipe pelampung silinder ini diawali dengan pemasangan mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder pada kolam simulator, setelah mekanisme PLTGL tipe pelampung terpasang dengan baik, kemudian pengaturan panjang lengan 50 cm dan panjang strock pada kolam simulator sebesar 11 cm, pengujian dinamis dilakukan dengan frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz yaitu dengan mengatur *switch inverter* pada alat inverter.

4.5 Hasil dan Analisa Hasil pengujian

4.5.1 Energi Bangkitan yang Dihasilkan PLTGL Tipe Pelampung Silinder

Dari pengujian yang dilakukan dengan daya gelombang digunakan berupa sinusoidal di atas, didapat pula besaran energi bangkitan yang dihasilkan pada masing-masing frekuensi, panjang lengan dan panjang pelampung yang digunakan. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.10 energi bangkitan dari PLTGL tipe silinder sebagai berikut:

Tabel 4.10 Hasil pengujian energi bangkitan PLTGL tipe silinder

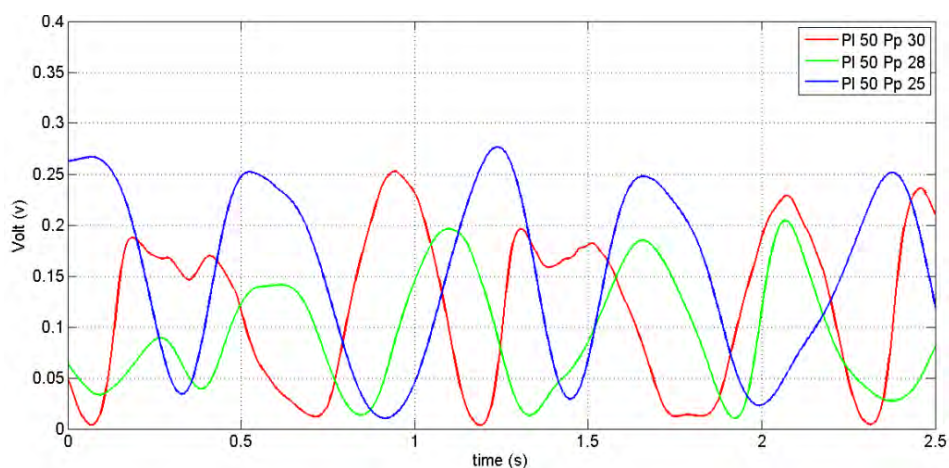
Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Hasil Eksperimen (volt)
1 Hz	50	30	0.1863
		28	0.1543
		25	0.1175
	45	30	0.2244
		28	0.2235
		25	0.1936
	30	30	0.2825
		28	0.2293
		25	0.2258

2 Hz	50	30	0.1788
		28	0.1601
		25	0.1489
	45	30	0.2355
		28	0.2238
		25	0.1978
	30	30	0.2851
		28	0.2513
		25	0.2351
3 Hz	50	30	0.2157
		28	0.2031
		25	0.1683
	45	30	0.2577
		28	0.2461
		25	0.2404
	30	30	0.2889
		28	0.2563
		25	0.2376

Dari tabel 4.10 yang ditampilkan diatas diketahui bahwa energi yang dihasilkan relatif berubah mengikuti perubahan panjang lengan, panjang pelampung dan perubahan frekuensi. Terlihat terjadi perubahan energi yang dihasilkan, semakin pendek panjang lengan energi yang dihasilkan semakin besar. Tetapi semua itu bertolak belakang dengan panjang pelampung, semakin panjang pelampung maka energi yang dihasilkan semakin besar, begitu juga sebaliknya. Sedangkan perubahan frekuensi juga sangat berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan. semakin besar frekuensi gelombang maka energi yang dihasilkan semakin besar. Hal ini terlihat dari rumus potensi daya yang diserap dari gelombang laut, dimana $P_w = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \cdot L$. Jika ditinjau dari peningkatan frekuensi, maka secara umum daya yang dihasilkan PLTGL tipe pelampung silinder akan terus bertambah seiring peningkatan frekuensi. Sedangkan energi tertinggi dihasilkan pada frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 30 cm yaitu sebesar 0.2889 volt.

4.5.2 Frekuensi 1 Hz pada panjang lengan 50 cm.

Hasil eksperimen pada frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 50 cm terhadap variasi pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm, grafik respon pengaruh panjang lengan, panjang pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.24 berikut ini.



Gambar 4.24 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, P_L 50 cm, P_p 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.1863 volt, 0.1543 volt dan 0.1175 volt.

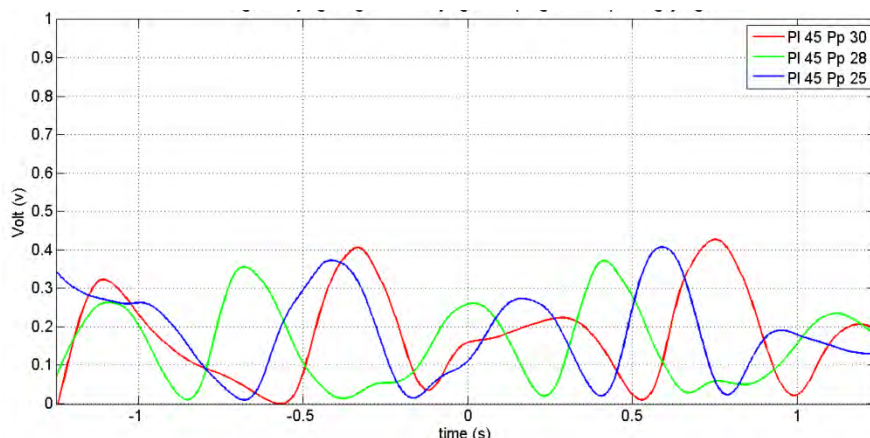
Dari gambar 4.24 di atas, hasil pengujian dengan frekuensi 1 Hz, panjang lengan 50 cm, variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan. Jika dibandingkan maka masing-masing variasi, pada saat variasi pelampung 30 cm nilai rms tegangan yang paling besar 0.1863 volt, sedangkan energi yang paling kecil 0.1175 volt pada variasi pelampung 25 cm.

Pada setiap perubahan panjang dari pelampung menyebabkan besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator semakin berubah, semakin panjang pelampung energi yang dihasilkan semakin besar, semua itu disebabkan oleh semakin luas permukaan dari pelampung maka daya angkat dari wave semakin besar, maka daya gelombang yang mampu ditangkap oleh pelampung juga semakin besar.

4.5.3 Pengujian dengan frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 45 cm

Dari hasil pengujian dengan panjang lengan 45 cm dengan variasi pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm didapat pengaruh besarnya energi yang

dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.25 respon energi bangkitan berikut ini.



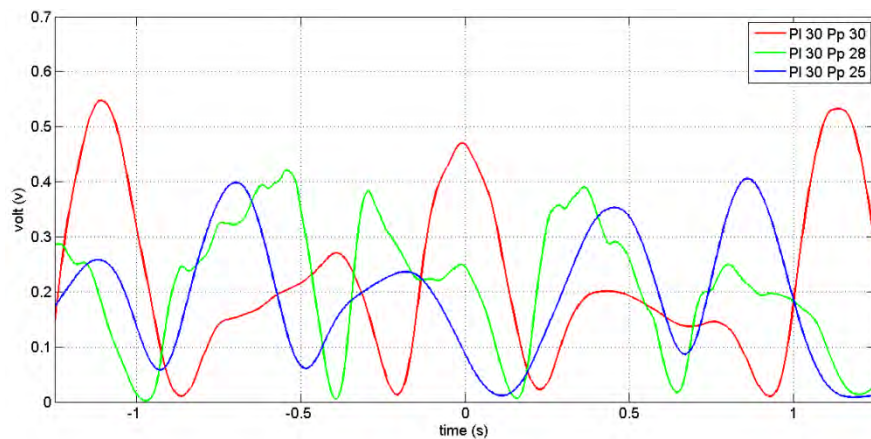
Gambar 4.25 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, P_L 45 cm, P_P 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2244 volt, 0.2235 volt dan 0.1936 volt.

Dari gambar 4.25 terlihat bahwa perubahan panjang pelampung berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan tak jauh bedanya. Pada pengujian dengan menggunakan frekuensi 1 Hz dan panjang lengan 45 cm dengan variasi panjang lengan 30 cm, 28 cm dan 25 cm. rms energi yang dihasilkan paling besar 0.2244 volt adalah pada panjang pelampung 30 cm, diikuti rms 0.2235 volt pada panjang pelampung 28 cm dan paling kecil rms 0.1936 volt pada pelampung 25 cm.

Berdasarkan hukum newton menjelaskan semakin luas permukaan angkat, maka gaya angkat yang dihasilkan akan semakin besar, hal ini menandakan luasan pelampung berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan.

4.5.4 Pengujian dengan frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 30 cm

Sedangkan pada pengujian dengan panjang lengan 30 cm terhadap variasi pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm didapat respon energi yang dihasilkan PLTGL seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.26 dibawah ini.



Gambar 4.26 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, P_L 30 cm, P_p 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2825 volt, 0.2293 volt dan 0.2258 volt.

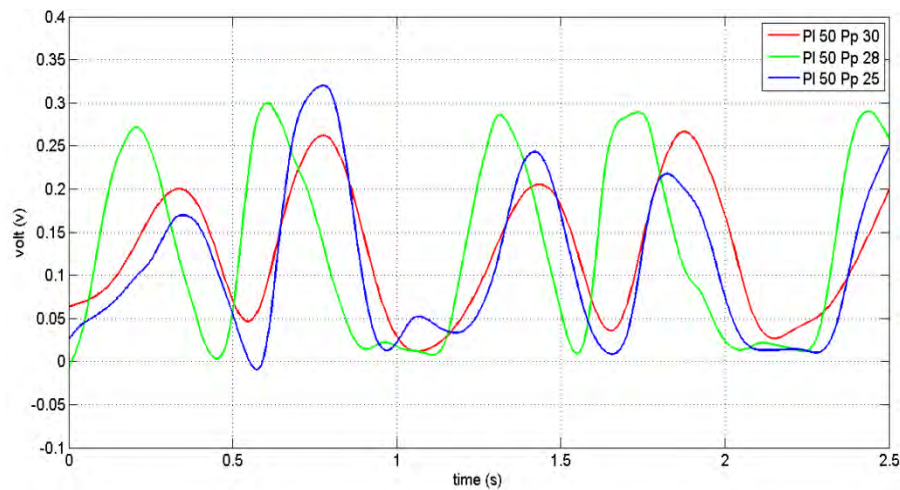
Pada gambar 4.26 menunjukkan pada panjang lengan 30 cm dan frekuensi 1 Hz terhadap variasi pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm. rms 0.2825 volt merupakan tegangan maksimal yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 30 cm, sedangkan energi paling kecil dihasilkan pada panjang 30 cm dengan panjang pelampung 25 cm energi yang dihasilkan sebesar 0.2258 volt.

Dari gambar 4.26 menunjukkan bahwa semakin pendek lengan pengungkit dan semakin panjang pelampung energi gelombang laut yang mampu ditangkap semakin besar dan energi yang dihasilkan semakin besar, begitu juga sebaliknya, semakin pendek pelampung maka energi yang dihasilkan semakin kecil, semua itu disebabkan jika semakin pendek pelampung maka daya angkat gelombang yang mampu ditangkap pelampung sangat kecil.

4.5.5 Hasil eksperimen frekuensi 2 Hz pada panjang lengan 50 cm

Dari hasil pengujian yang dilakukan pada frekuensi 2 Hz dan panjang lengan 50 cm, 45 cm dan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan.

Pengujian pertama dilakukan dengan panjang lengan 50 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm, sedangkan energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.27 berikut ini.



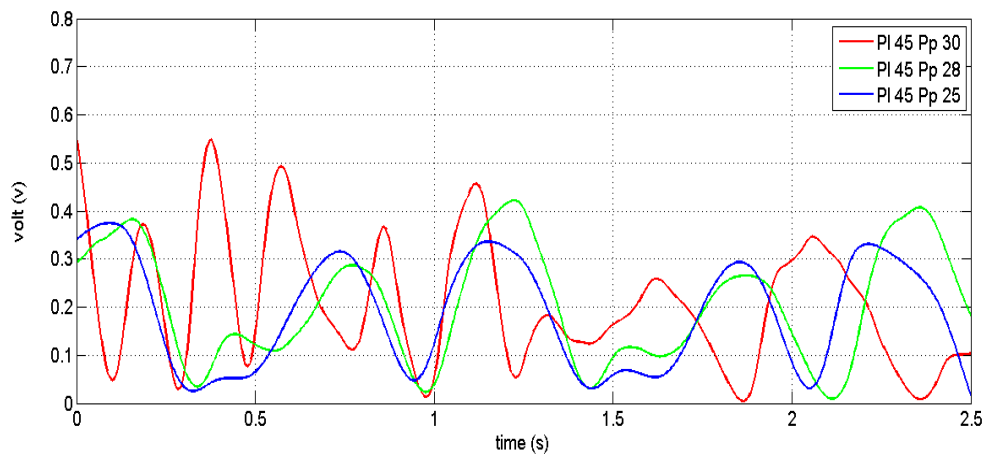
Gambar 4.27 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, P_L 50 cm, P_P 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.1788 volt, 0.1601 volt dan 0.1489 volt.

Pada gambar 4.27 menunjukkan pada frekuensi 2 Hz, panjang lengan 50 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan oleh generator, rms 0.1788 volt tertinggi mampu dihasilkan pelampung yang panjangnya 30 cm, sedangkan energi yang terkecil rms 0.1489 volt yang dihasilkan oleh pelampung yang paling pendek 25 cm.

Dari gambar 4.27 tersebut menunjukkan bahwa panjang pelampung sangat berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan oleh generator, dimana luasan dari permukaan pelampung berpengaruh terhadap besar kecilnya kemampuannya untuk memanfaatkan gaya angkat yang dihasilkan oleh gelombang laut.

4.5.6 Pengujian dengan frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 45 cm

Pada pengujian dari panjang lengan 45 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan, disajikan pada gambar 4.28 berikut ini.



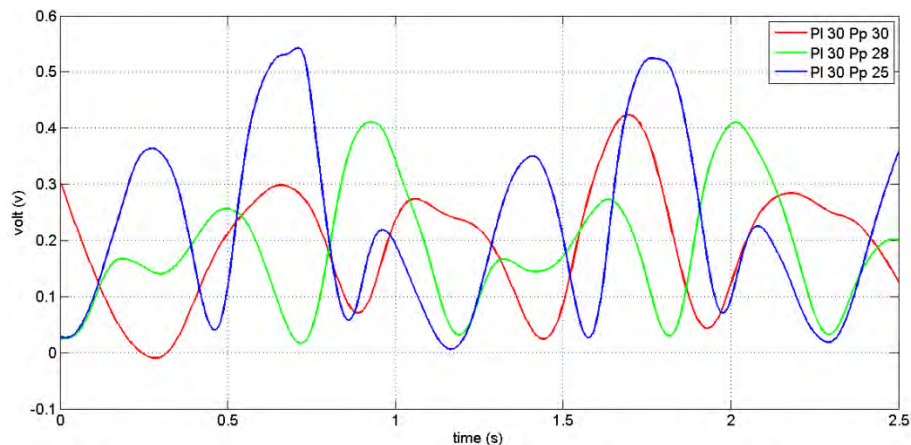
Gambar 4.28 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, P_L 45 cm, P_P 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2355 volt, 0.2238 volt dan 0.1978 volt.

Dari gambar 4.28 di atas pada frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 45 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm. jika dibandingkan dengan masing-masing variasi panjang pelampung, pada saat panjang pelampung 25 cm merupakan energi yang paling kecil yaitu rms 0,1978 volt. Pada panjang pelampung 30 cm nilai paling besar yaitu rms 0,2355 volt. Hal ini menunjukkan bahwa nilai bangkitan energi terbesar menggunakan panjang pelampung 30 cm.

Pada setiap penambahan panjang pelampung maka akan menyebabkan energi yang dihasilkan pada generator semakin besar. Hal ini dapat dilihat dari rms yang dihasilkan dari mekanisme PLTGL, panjang pelampung berpengaruh terhadap daya angkat yang dihasilkan dari gelombang simulator, sehingga nilai peak amplitudo energi yang dihasilkan semakin membesar.

4.5.7 Pengujian dengan frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 30 cm

Sedangkan hasil pengujian pada panjang lengan 30 cm terhadap variasi pelampung 30 cm, 28 cm, dan 25 cm. Besarnya energi yang dihasilkan seperti yang disajikan pada gambar 4.29 berikut ini.



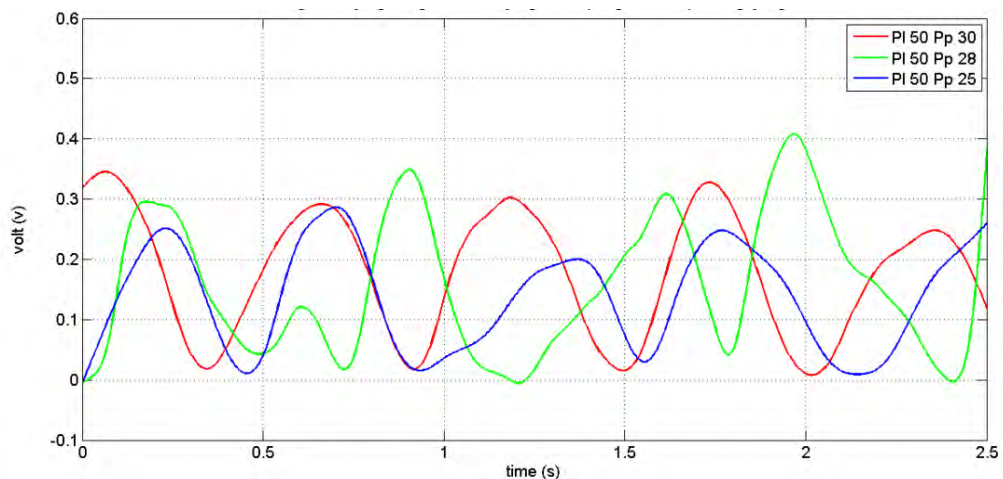
Gambar 4.29 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, P_L 30 cm, P_p 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2851 volt, 0.2513 volt dan 0.2351 volt.

Dari gambar 4.29 diatas pada frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 30 cm dan terhadap variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm. jika dibandingkan dengan masing-masing variasi panjang pelampung, energi yang paling besar dan stabil di hasilkan pada panjang pelampung 30 cm dengan panjang lengan 30 cm yaitu rms sebesar 0.2851 volt, sedangkan pada panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 25 cm menghasilkan energi bangkitan rms 0.2351 volt. Hal ini menunjukan bahwa pada frekuensi 2 Hz nilai bangkitan energi terbesar menggunakan panjang pelampung 30 cm dengan panjang pelampung 30 cm.

Pada setiap penambahan panjang pelampung maka akan menyebabkan kuat arus yang dihasilkan pada generator semakin besar. Hal ini dapat dilihat dari rms yang dihasilkan dari mekanisme PLTGL, panjang pelampung berpengaruh terhadap daya angkat yang dihasilkan dari gelombang simulator, sehingga nilai peak amplitudo energi yang dihasilkan semakin membesar.

4.5.8 Hasil eksperimen pada frekuensi 3 Hz pada panjang lengan 50 cm

Pada frekuensi gelombang 3 Hz dan panjang lengan 50 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm. Hasil pengujian dengan frekuensi gelombang dan panjang lengan ditampilkan pada gambar 4.30 berikut ini.



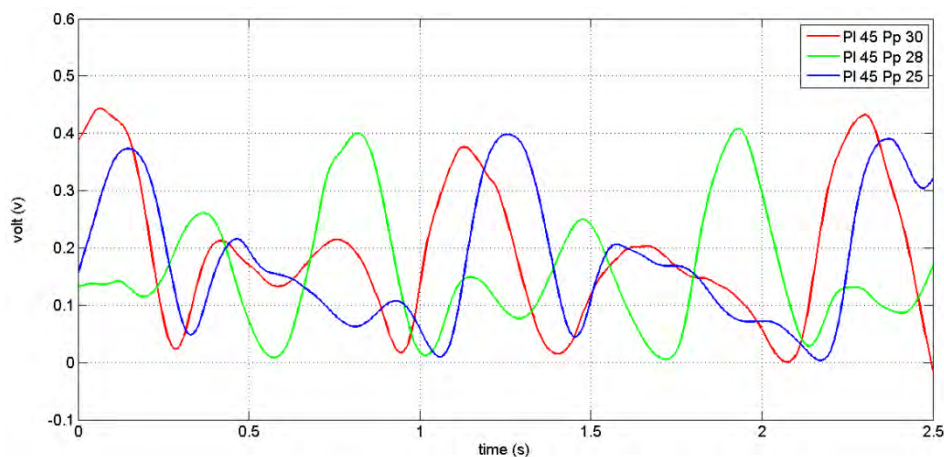
Gambar 4.30 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, P_L 50 cm, P_p 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2157 volt, 0.2031 volt dan 0.1683 volt.

Pada pengujian dengan menggunakan frekuensi 3 Hz dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0,2157, diikuti 0.2031 vol dan 0.1683 volt. rms terkecil terjadi pada variasi panjang pelampung 25 cm yaitu sebesar 0,1683 volt. Hal ini menunjukkan bahwa energi tertinggi dihasilkan pada panjang pelampung 30 cm.

Pada setiap penambahan panjang lengan maka akan menyebabkan energi yang dihasilkan akan semakin besar. Panjang pelampung akan berpengaruh terhadap luasan permukaan angkatan yang dihasilkan oleh gelombang pada kolam simulator.

4.5.9 Pengujian dengan frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 45 cm

Dengan panjang lengan 45 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan. Hasil pengujian dengan panjang lengan dan variasi pelampung ditampilkan pada gambar 4.31 berikut ini.



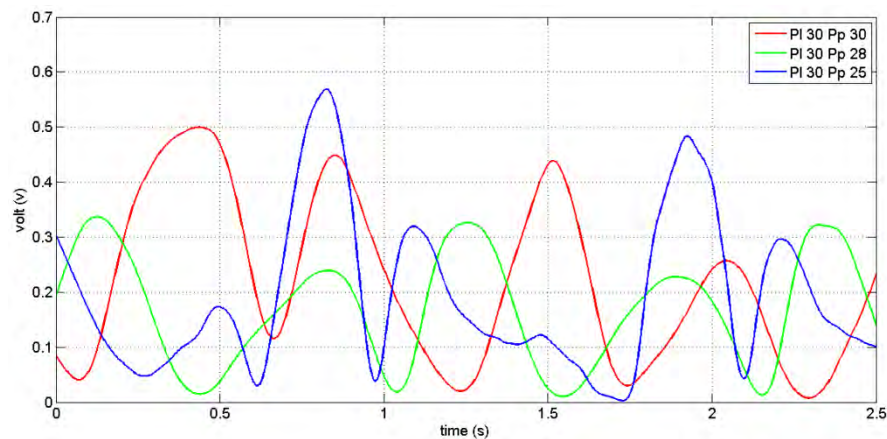
Gambar 4.31 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, P_L 45 cm, P_p 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2577 volt, 0.2461 volt dan 0.2404 volt.

Pada pengujian dengan menggunakan frekuensi 3 Hz dan panjang lengan 45 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0,2577 volt, diikuti 0.2461 vol dan 0.2304 volt. rms terkecil terjadi pada variasi panjang pelampung 25 cm yaitu sebesar 0,2404 volt, sedangkan energi maksimal dihasilkan pada panjang pelampung 30 cm sebesar 0.2577 volt. Hal ini menunjukkan bahwa energi tertinggi dihasilkan pada panjang pelampung 30 cm.

Pada setiap penambahan panjang lengan maka akan menyebabkan energi yang dihasilkan akan semakin besar. Panjang pelampung akan berpengaruh terhadap luasan permukaan angkat yang dihasilkan oleh gelombang pada kolam simulator.

4.5.10 Pengujian dengan frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 30 cm

Pada panjang lengan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap besarnya energi yang dihasilkan dari mekanisme PLTGL ditampilkan pada gambar 4.32 berikut ini.



Gambar 4.32 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, P_L 30 cm, P_p 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0.2889 volt, 0.2563 volt dan 0.2376 volt.

Pada pengujian dengan menggunakan frekuensi 3 Hz dan panjang lengan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm dengan rms 0,2889 volt, diikuti 0.2563 vol dan 0.2376 volt. rms terkecil terjadi pada variasi panjang pelampung 25 cm yaitu sebesar 0,2776 volt, sedangkan pada panjang pelampung 30 cm mendapat energi maksimal sebesar 0,2889 volt.

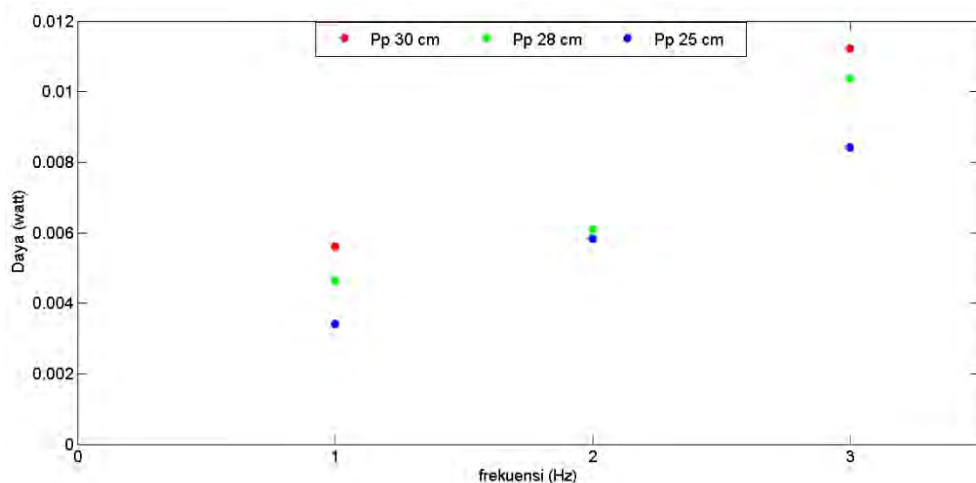
Pada setiap penambahan panjang lengan maka akan menyebabkan energi yang dihasilkan akan semakin besar. Panjang pelampung akan berpengaruh terhadap luasan permukaan angkatan yang dihasilkan oleh gelombang pada kolam simulator.

4.5.11 Analisa hasil eksperimen pengaruh frekuensi dan panjang lengan terhadap energi yang dihasilkan

Pada analisa hasil eksperimen pengaruh variasi panjang lengan 50 cm, 45 cm dan 30 cm terhadap panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm, untuk mencari seberapa besar perubahan energi yang dihasilkan pada saat variasi panjang lengan 50 cm, 45 cm dan 30 cm pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz.

1. Panjang lengan 50 cm

Hubungan variasi panjang lengan 50 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz terhadap energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.33 berikut ini.



Gambar 4.33 Grafik hubungan panjang lengan 50 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan.

Dari gambar 4.33 di atas terlihat setiap perubahan panjang pelampung terjadi perubahan daya yang dihasilkan mekanisme PLTGL. Besarnya daya yang dihasilkan pada mekanisme ini ditampilkan pada tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4.11 Hasil eksperimen pada panjang lengan 50 cm

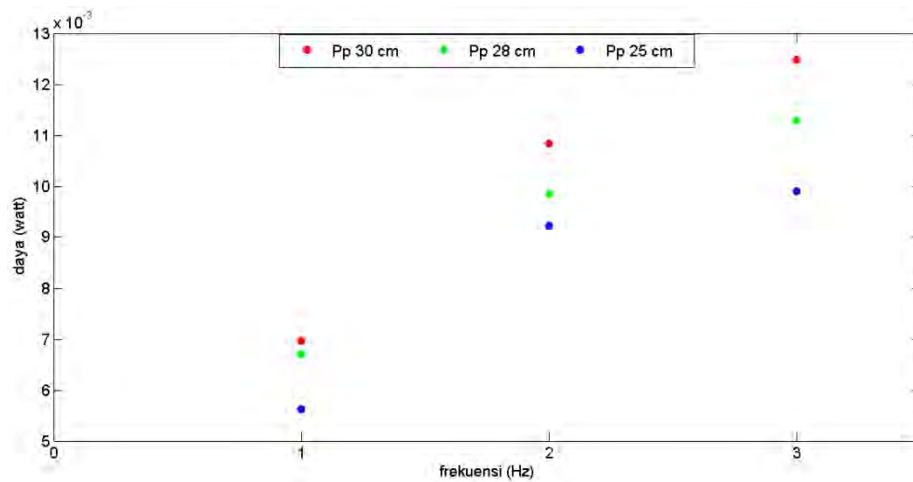
Pl (cm)	Frekuensi (Hz)	Pp (cm)	P Hasil eksperimen (watt)
50 cm	1	30	0.005589
		28	0.004629
		25	0.003408
	2	30	0.006079
		28	0.006084
		25	0.005807
	3	30	0.011216
		28	0.010358
		25	0.008415

Dari tabel 4.11 diatas bahwa pada panjang lengan 50 cm rms daya yang maksimal dihasilkan pada panjang lengan 30 cm dengan frekuensi 3 Hz yaitu 0.011216 watt. Sedangkan daya rms yang minimum dihasilkan pada panjang pelampung 25 cm pada frekuensi 1 Hz yaitu sebesar 0.003408 watt. Dari perbedaan energi yang dihasilkan terlihat dengan berubahnya panjang pelampung sangat berpengaruh terhadap besarnya energi yang dihasilkan, semakin panjang pelampung maka daya angkat yang dihasilkan semakin besar dan semakin besar

frekuensi maka pergerakan lengan semakin cepat, maka berpengaruh terhadap kecepatan putaran pada *gearbox* dan energi yang dihasilkan semakin besar.

2. Panjang Lengan 45 cm

Hubungan panjang lengan 45 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz. Hasil dari pengaruh variasi panjang lengan terhadap variasi panjang pelampung ditampilkan pada gambar 4.34 berikut.



Gambar 4.34 Grafik hubungan panjang lengan 45 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan.

Pada gambar 4.34 terlihat perubahan panjang pelampung berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan, rms daya yang dihasilkan ditampilkan pada tabel 4.12 berikut ini.

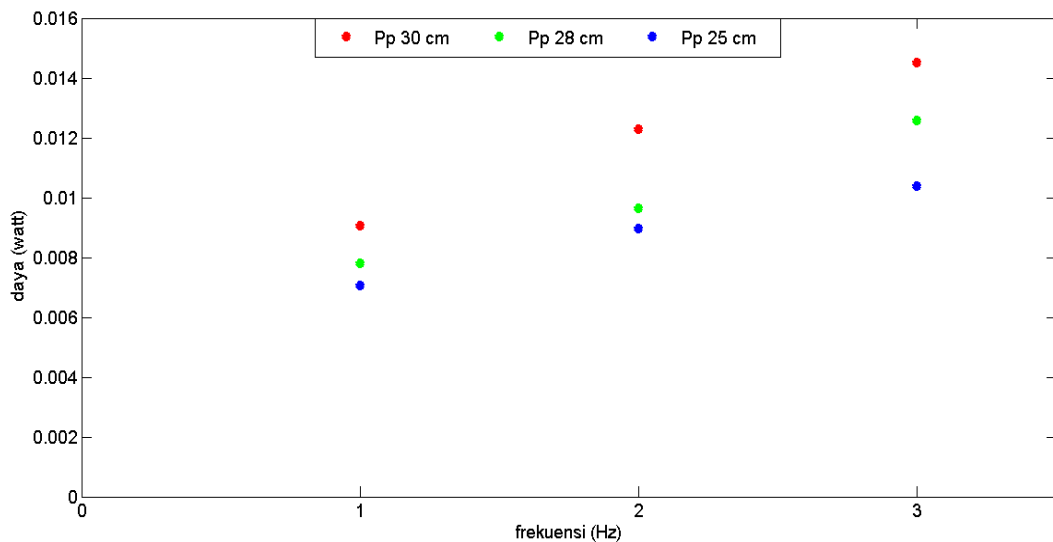
Tabel 4.12 Hasil eksperimen pada panjang lengan 45 cm

Pl (cm)	Frekuensi (Hz)	Pp (cm)	P Hasil eksperimen (watt)
45 cm	1	30	0.006956
		28	0.006705
		25	0.005614
	2	30	0.010823
		28	0.009844
		25	0.009216
	3	30	0.012482
		28	0.011276
		25	0.00989

Dari tabel 4.12 diatas rms daya maksimum dihasilkan pada panjang pelampung 30 cm sebesar 0.012482 watt yaitu pada frekuensi 3 Hz. Sedangkan rms minum dihasilkan pada panjang pelampung 25 cm dengan daya sebesar 0.005614 watt. Dari perubahan yang dihasilkan tersebut memperlihatkan panjang pelampung dan panjang lengan serta besarnya frekuensi sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan oleh mekanisme. Luasan dari permukaan pelampung berpengaruh terhadap daya angkat yang dihasilkan oleh mekanisme yang berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan.

3. Panjang Lengan 30 cm

Hasil hubungan panjang lengan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan dengan frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz. Pengaruh dari variasi pelampung ditampilkan pada gambar 4.35 berikut ini.



Gambar 4.35 Grafik hubungan panjang lengan 30 cm dengan variasi panjang pelampung 30 cm, 28 cm dan 25 cm terhadap energi yang dihasilkan.

Pada gambar 4.35 terlihat perubahan panjang pelampung berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan, besar rms daya yang dihasilkan ditampilkan pada tabel 4.13 berikut ini.

Tabel 4.13 Hasil eksperimen pada panjang lengan 30 cm

Pl (cm)	Frekuensi (Hz)	Pp (cm)	P Hasil eksperimen (watt)
30 cm	1	30	0.00904
		28	0.00779
		25	0.00705
	2	30	0.01225
		28	0.00963
		25	0.00895
	3	30	0.01450
		28	0.01256
		25	0.01038

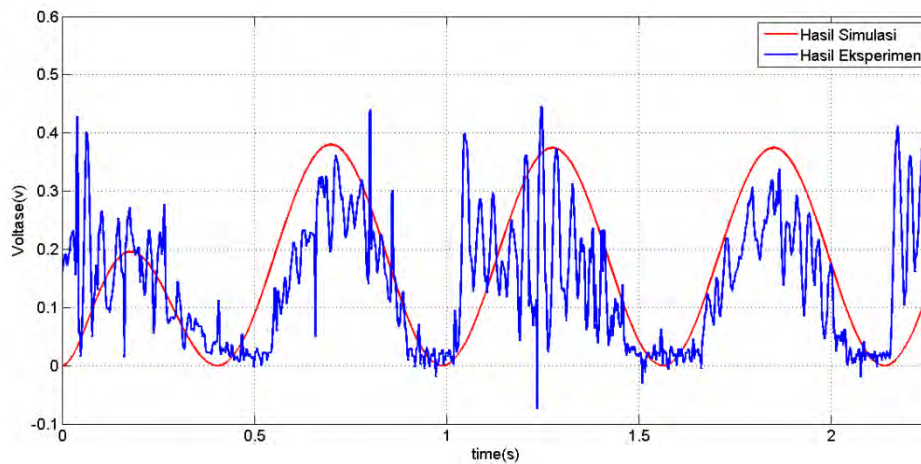
Dari tabel 4.13 diatas rms daya maksimal dihasilkan panjang pelampung 30 cm sebesar 0.01450 watt yaitu pada frekuensi 3 Hz. Sedangkan rms daya minimum dihasilkan pada panjang pelampung 25 cm sebesar 0.00705 watt. Dari perubahan yang dihasilkan tersebut memperlihatkan panjang pelampung dan panjang lengan serta besarnya frekuensi sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan oleh mekanisme.

4.6 Error yang Terjadi antara Hasil Simulasi Terhadap Hasil Eksperimen

Mencari nilai error dilakukan untuk melihat kesamaan pola hasil simulasi dan eksperimen dari respon dinamis berupa energi bangkitan. Jika grafik rms yang dihasilkan simulasi berbeda maka kemungkinan besar terjadi kesalahan dalam proses simulasi. Dalam proses validasi ini hasil simulasi menjadi acuan dari hasil eksperimen. Selain untuk melihat kesamaan grafik rms, juga untuk melihat seberapa besar error yang terjadi pada simulasi.

4.6.1 Energi yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm.

Inputan yang diberikan pada simulasi maupun pada eksperimen merupakan sinusoidal dari kolam simulator, pada panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dengan variasi frekuensi 1 Hz. Hasil dari simulasi dan eksperimen dengan eksitasi harmonik ditampilkan pada gambar 4.36 berikut.



Gambar 4.36 Grafik hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 1 Hz dengan panjang pelampung 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm.

Pada gambar 4.36 diatas terlihat dengan jelas nilai tren eksperimen mengikuti simulasi, nilai simulasi dijadikan sebagai acuan untuk eksperimen, nilai rms simulasi yang dihasilkan 0.1807 volt dan nilai rms pada eksperimen yang dihasilkan 0.1788 volt. Nilai error dihitung sebagai berikut.

Besarnya error yang terjadi pada frekuensi 1 Hz dan panjang lengan 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm:

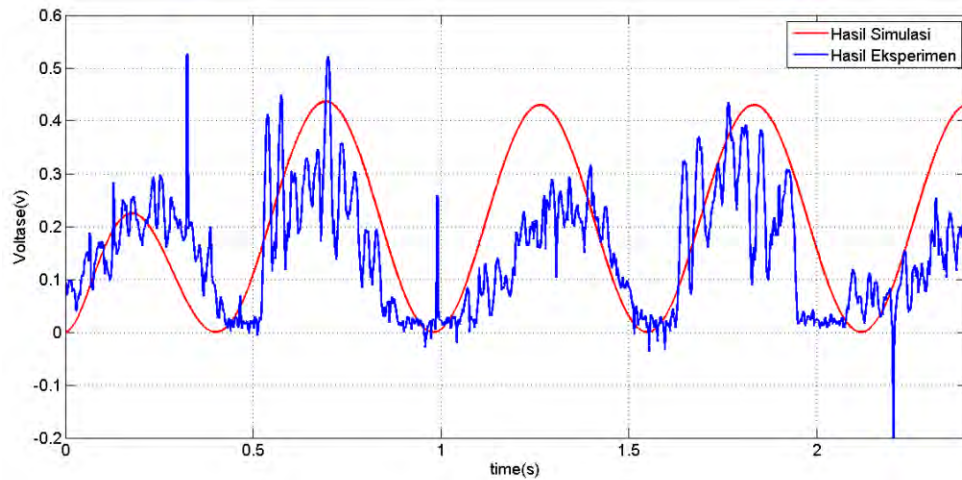
$$\varepsilon = \frac{V_{simulasi} - V_{eksperimen}}{V_{simulasi}} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{0.1807 - 0.1788}{0.1807} \times 100\% = 1.0514 \%$$

Dari hasil perhitung didapatkan masing-masing error sebesar 1.0514 %. Besar error yang terjadi salah satunya disebabkan oleh adanya gaya gesek yang tidak diperhitungkan pada simulasi dan adanya gelombang balik yang terjadi pada kolam simulator dan tidak stabilnya gelombang pada kolam sehingga ada error antara simulasi dengan eksperimen.

4.6.2 Energi yang dihasilkan pada frekuensi 2 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm.

Inputan yang diberikan pada simulasi maupun pada eksperimen pada panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dengan variasi frekuensi 2 Hz. Hasil dari simulasi dan eksperimen dengan eksitasi gelombang laut.



Gambar 4.37 Grafik hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 2 Hz dengan panjang pelampung 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm.

Pada gambar 4.37 di atas terlihat dengan jelas tren hasil eksperimen mengikuti hasil dari simulasi. Nilai rms hasil simulasi sebesar 0.1917 volt dan nilai rms eksperimen sebesar 0.1863 volt. Dari tren tersebut terlihat bahwa terdapat beberapa error yang terjadi antara grafik simulasi terhadap grafik eksperimen.

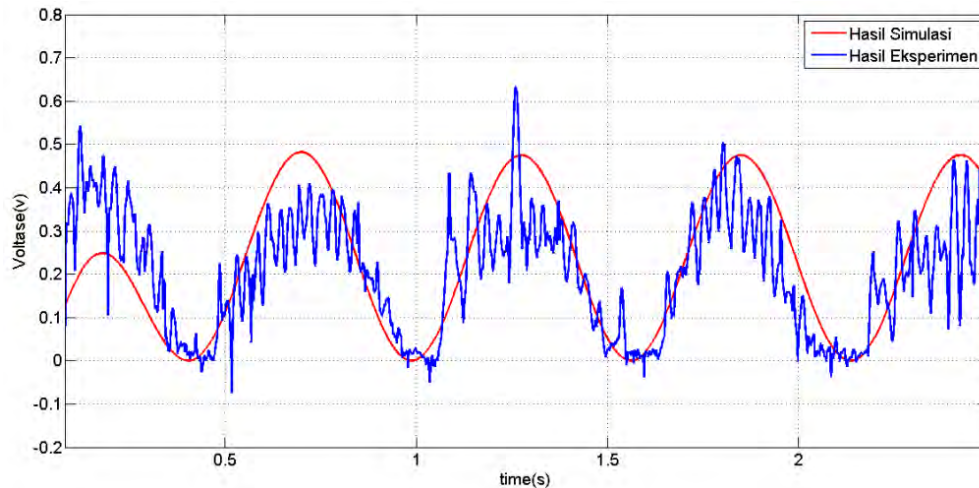
Besarnya error yang terjadi pada frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dapat dihitung sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{0.1917 - 0.1863}{0.1917} \times 100\% = 2.816 \%$$

Pada perhitungan diatas terlihat bahwa error yang terjadi pada frekuensi 1 Hz masing-masing sebesar 2.816 % . Besarnya error yang terjadi salah satunya disebabkan oleh adanya gelombang balik pada kolam simulator dan adanya perbedaan frekuensi pada inferter terhadap kolam simulator.

4.6.3 Energi yang dihasilkan pada frekuensi 3 Hz, panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm.

Inputan yang diberikan berupa gelombang sinusoidal dengan frekuensi 3 Hz, dengan variasi panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm, berupa dua buah grafik energi yang dihasilkan secara simulasi dan eksperimen, ditampilkan pada gambar 4.38 berikut ini.



Gambar 4.38 Grafik hasil simulasi dan eksperimen pada frekuensi 3 Hz dengan panjang pelampung 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Pada gambar 4.38 di atas terlihat dengan jelas tren hasil eksperimen mengikuti tren hasil simulasi, nilai rms hasil simulasi 0.2181 volt dan nilai rms eksperimen 0.2157 volt. Pada nilai peak amplitudo terlihat ada sedikit perbedaan yang terjadi antara tren simulasi terhadap tren eksperimen, perbedaan peak amplitudo tersebut menandakan adanya error yang terjadi antara eksperimen dengan simulasi.

Besarnya nilai error yang terjadi pada frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dapat dihitung sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{0.2181 - 0.2157}{0.2181} \times 100\% = 1.1004 \%$$

Dari perhitungan didapat nilai masing-masing error yang terjadi adalah 1.1004 %. Besarnya error yang terjadi salah satunya disebabkan oleh adanya gelombang balik pada eksperimen, serta kurang stabilnya gelombang yang terjadi pada eksperimen yang menyebabkan gerakan pelampung dan mekanisme PLTGL tidak normal.

Tabel 4.14 Persentase error yang terjadi pada hasil simulasi dan hasil eksperimen

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Hasil Simulasi (volt)	Hasil Eksperimen (volt)	Error %
1 Hz	50	30	0.1807	0.1788	1.05147
		28	0.1555	0.1543	0.7717
		25	0.13	0.1175	9.61538
	45	30	0.2501	0.2244	10.2759
		28	0.2422	0.2235	7.72089
		25	0.2063	0.1936	6.15608
	30	30	0.2916	0.2825	3.12071
		28	0.2601	0.2293	11.8416
		25	0.2481	0.2258	8.98831
2 Hz	50	30	0.1917	0.1863	2.8169
		28	0.1757	0.1601	8.87877
		25	0.1515	0.1489	1.71617
	45	30	0.2651	0.2355	11.1656
		28	0.2469	0.2238	9.35601
		25	0.2352	0.1978	15.9014
	30	30	0.2901	0.2851	1.72354
		28	0.241	0.2513	4.2739
		25	0.2289	0.2351	2.7086
3 Hz	50	30	0.2181	0.2157	1.10041
		28	0.2071	0.2031	1.93143
		25	0.1859	0.1683	9.46746
	45	30	0.271	0.2577	4.90775
		28	0.2529	0.2461	2.68881
		25	0.241	0.2404	0.24896
	30	30	0.3099	0.2889	6.77638
		28	0.2838	0.2563	9.68992
		25	0.2494	0.2376	4.73136
Error rata-rata					5.39483

Dari tabel 4.14 besarnya rata-rata error yang terjadi yang tidak signifikan, besarnya error rms disebabkan oleh beberapa sistem pada simulasi yang tidak diperhitungkan, serta pengaruh frekuensi pada kolom simulator sangat

berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan. Besarnya rata-rata error yang terjadi pada mekanis yaitu sebesar rms 5.3948 %.

4.7 Efisiensi PLTGL Dalam Menghasilkan Energi

Perhitungan potensi daya yang dapat dihasilkan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan rumus:

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \cdot L$$

Maka selanjutnya perhitungan efisiensi PLTGL dalam memulihkan energi, menggunakan rumus berikut:

$$\eta_{PLTGL} = \frac{P_{output}}{P_w} \times 100\%$$

Besarnya efisiensi yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL yang dibangun berpengaruh terhadap kolom simulator yang digunakan, daya maksimum diambil dengan menghitung nilai daya gelombang air laut dan daya yang dihasilkan oleh mekanisme kemudian membagi daya gelombang air laut dengan daya keluaran mekanisme PLTG dikali 100%.

Contoh hasil perhitungan efisiensi mekanisme adalah sebagai berikut:

$$\eta_{PLTGL} = \frac{0,00989}{0,097} \times 100\% = 10.2 \%$$

Nilai efisiensi yang diperoleh sebesar 10.2 %, nilai efisiensi dari mekanisme ini dipengaruhi oleh nilai error atau *losses* pada mekanisme seperti nilai gesek pada bearing dan komponen lainnya. Daya gelombang laut diperoleh dari persamaan $P_w = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \cdot L$, sehingga nilai P_{wave} yang didapat sebesar 0,097 watt.

Tabel 4.15 Hasil perhitungan efisiensi mekanis pada PLTGL

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	V ek (volt)	P ek (watt)	Pk simulator (watt)	Efisiensi %
1 Hz	50	30	0.186	0.006	0.097	5.792
		28	0.154	0.005	0.097	4.797
		25	0.118	0.003	0.097	3.532
	45	30	0.224	0.007	0.097	7.208

		28	0.224	0.007	0.097	6.948
		25	0.194	0.006	0.097	5.818
	30	30	0.283	0.009	0.097	9.368
		28	0.229	0.008	0.097	8.073
		25	0.226	0.007	0.097	7.309
2 Hz	50	30	0.179	0.006	0.097	6.299
		28	0.160	0.006	0.097	6.305
		25	0.149	0.006	0.097	6.018
	45	30	0.236	0.011	0.097	11.216
		28	0.224	0.010	0.097	10.201
		25	0.198	0.009	0.097	9.550
	30	30	0.285	0.012	0.097	12.704
		28	0.251	0.010	0.097	9.980
		25	0.235	0.009	0.097	9.277
3 Hz	50	30	0.216	0.011	0.097	11.623
		28	0.203	0.010	0.097	10.734
		25	0.168	0.008	0.097	8.720
	45	30	0.258	0.012	0.097	12.935
		28	0.246	0.011	0.097	11.685
		25	0.240	0.010	0.097	10.249
	30	30	0.289	0.015	0.097	15.029
		28	0.256	0.013	0.097	13.017
		25	0.238	0.010	0.097	10.756
Rata-rata						9.079

Pada tabel 4.15 diatas besarnya nilai efisiensi rata-rata peroleh sebesar 9.079 %. Besarnya efisiensi tersebut dipengaruhi oleh beberapa mekanis pada PLTGL tipe pelampung silinder, seperti terjadi kerugian gesek yang terjadi pada mekanisme, seperti pada poros, bearing dan roda gigi. Jika dibandingkan dengan efisiensi hasil penelitian K.S Lok (2014), maka hasil efisiensi penelitian ini lebih kecil secara rata-rata. Akan tetapi pada frekuensi 3 Hz penelitian ini mempunyai nilai efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan penelitian K.S Lok yang memiliki rata-rata sebesar 11%. Hal ini disebabkan karena perbedaan dari bentuk pelampung yang digunakan, meskipun sama-sama menggunakan rotary generator. Pada penelitian K.S Lok menggunakan pelampung setengah lingkaran sedangkan penelitian menggunakan pelampung silinder.

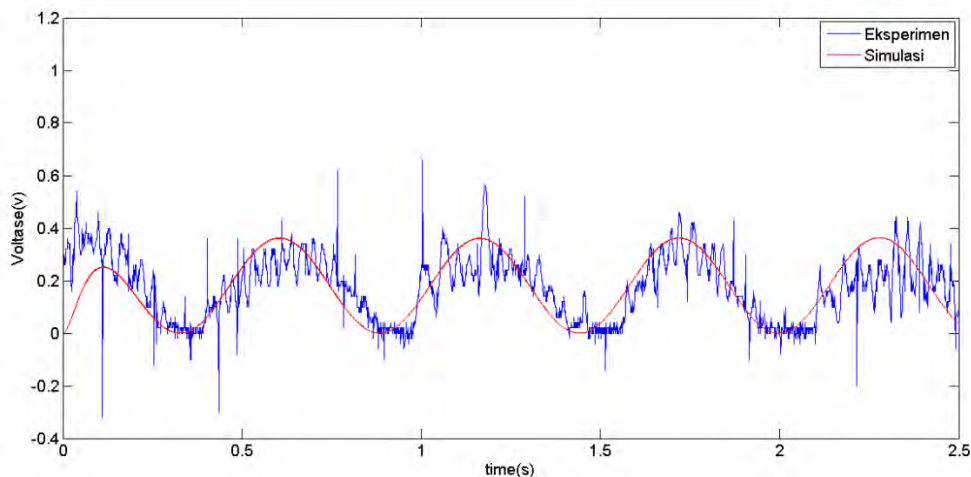
4.8 Validasi Hasil Simulasi Terhadap Hasil Eksperimen

Validasi dilakukan untuk melihat kesamaan pola hasil simulasi dan eksperimen dari respon dinamis berupa energi bangkitan. Jika grafik rms yang dihasilkan simulasi berbeda maka kemungkinan besar terjadi kesalahan dalam proses simulasi. Dalam proses validasi ini hasil simulasi menjadi acuan dari hasil eksperimen. Selain untuk melihat kesamaan grafik rms, juga untuk melihat seberapa besar error yang terjadi pada simulasi.

$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

4.8.1 Validasi pada frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Untuk mendapatkan hasil simulasi supaya bisa dijadikan panduan dalam merancang mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder maka perlu diadakan validasi dari simulasi tersebut, hasil simulasi ditampilkan pada gambar 4.39 berikut ini:



Gambar 4.39 Grafik hasil validasi pada frekuensi 1 Hz dengan panjang pelampung 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Besarnya error yang terjadi pada validasi ini adalah sebagai berikut dimana besarnya nilai error yang terjadi pada frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dapat dihitung sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{0.1801 - 0.1788}{0.1801} \times 100\% = 0.722 \%$$

Dari hasil validasi pada gambar 4.39 diatas didapat error sebesar 0.722 %, dari hasil error tersebut disebabkan beberapa permasalahan yang terjadi pada eksperimen, seperti gelombang balik pada kolam simulator. Untuk menghitung daya validasi digunakan rumus sebagai berikut.

$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

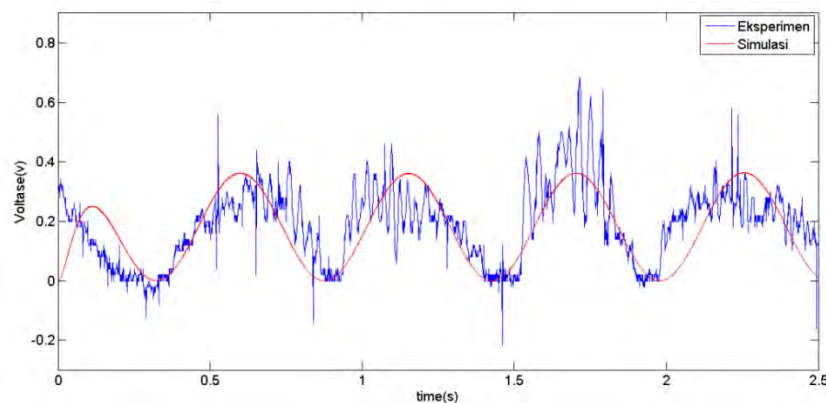
Hasil perhitungan daya validasi berdasarkan rumus diatas dapat dilihat pada data berikut.

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Error 1 (%)	Error 2 (%)	Efisiensi (%)	P _{input} (watt)	P _{validasi} (watt)
1	50	30	1.0514	0.722	5.792	0.097	0.0051

Sedangkan hasil daya validasi ($P_{validasi}$) yang dihasilkan dari rumus perhitungan pada frekuensi 1 Hz dengan panjang lengan 50 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm yaitu 0.0051 watt.

4.8.2 Validasi pada frekuensi 2 Hz dengan panjang lengan 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Inputan yang diberikan pada simulasi maupun pada eksperimen pada panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dengan variasi frekuensi 2 Hz. Hasil dari simulasi dan eksperimen dengan eksitasi gelombang laut. Dari hasil perhitungan error simulasi terhadap hasil eksperimen dan rata-rata efisiensi dimasukkan kedalam persamaan validasi $P_{validasi} = \eta_{PLTGL} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$ maka didapat hasil validasi seperti pada gambar 4.40 berikut ini.



Gambar 4.40 Grafik hasil validasi pada frekuensi 2 Hz dengan panjang pelampung 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Besarnya error yang terjadi pada frekuensi 2 Hz ini dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dapat dihitung sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{0.1873 - 0.1863}{0.1873} \times 100\% = 0.534 \%$$

Pada gambar 4.40 diatas diperoleh error sebesar 0. 534 %, besarnya error tersebut disebabkan beberapa hal seperti terjadi gelombang balik pada kolam simulator yang menyebabkan tinggi amplitudo pada gelombang tidak stabil. Untuk menghitung daya validasi digunakan rumus sebagai berikut.

$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

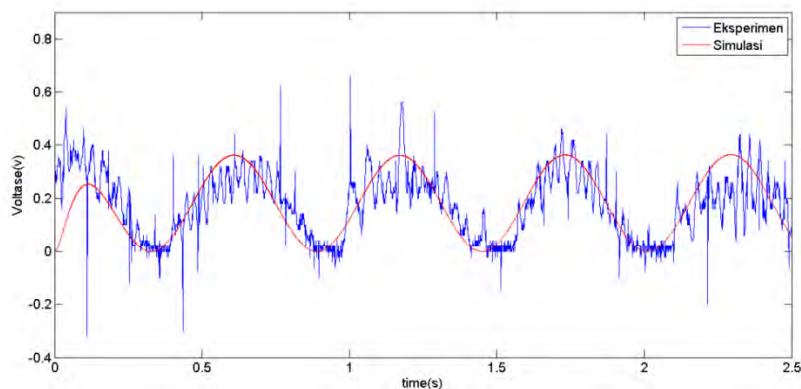
Hasil perhitungan daya validasi berdasarkan rumus diatas dapat dilihat pada data berikut.

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Error 1 (%)	Error 2 (%)	Efisiensi 1 (%)	P _{input} (watt)	P _{validasi} (watt)
2	50	30	2.8169	0.534	6.299	0.097	0.010

Dari hasil validasi diperoleh daya validasi (P_{validasi}) sebesar 0.010 watt. dimana daya yang diperoleh dari hasil perhitungan beberapa pengurangan error dan efisiensi pada mekanisme.

4.8.3 Validasi pada frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Inputan yang diberikan pada eksperimen dan simulasi ini dengan frekuensi sebesar 3 Hz dengan daya yang dihasilkan pada kolam simulator sebesar 0.097 watt pada variasi lengan 50 cm dan variasi pelampung 30 cm. Besarnya error yang terjadi ditampilkan pada gambar 4.41 berikut ini.



Gambar 4.41 Grafik hasil validasi pada frekuensi 3 Hz dengan panjang pelampung 50 cm terhadap panjang pelampung 30 cm

Besarnya error yang terjadi pada frekuensi 3 Hz ini dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm dapat dihitung sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{0.2178 - 0.2157}{0.2178} \times 100\% = 0.964 \%$$

Dari hasil validasi pada gambar 4.39 diatas didapat error sebesar 0.964 %, dari hasil error tersebut disebabkan beberapa permasalahan yang terjadi pada eksperimen, seperti gelombang balik pada kolam simulator.

Dimana besarnya error pada frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 50 cm dan panjang pelampung 30 cm adalah sebagai berikut. Untuk menghitung daya validasi digunakan rumus sebagai berikut.

$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

Hasil perhitungan daya validasi berdasarkan rumus diatas dapat dilihat pada data berikut.

Frekuensi (Hz)	Pl (cm)	Pp (cm)	Error 1 (%)	Error 2 (%)	Efisiensi 1 (%)	P _{input} (watt)	P _{validasi} (watt)
3	50	30	1.10041	0.964	11.623	0.097	0.012

Sedangkan hasil daya validasi (P_{validasi}) yang dihasilkan dari rumus perhitungan pada frekuensi 3 Hz dengan panjang lengan 50 cm terhadap variasi panjang pelampung 30 cm yaitu 0.012 watt.

Untuk itu, dari penelitian ini didapatkan:

$$P_{out} = \eta \times \varepsilon \times P_{in}$$

Dimana:

η = Efisiensi mekanis (%)

ε = Error (%)

Sehingga persamaan menjadi:

$$P_{out} = f_k \times P_{in}$$

Dengan f_k adalah faktor koreksi dari mekanisme (*made correction factor*). Dimana persamaan ini hanya digunakan untuk mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder yang hanya memperhitungkan komponen mekanik.

4.9 Skala Mekanisme

Dari data efisiensi mekanisme dapat dihitung daya yang dihasilkan PLTGL ketika mekanisme diletakkan pada laut lepas. Dalam proses skala mekanisme perlu diperhatikan gelombang laut tempat mekanisme ini akan dipasang. Gelombang yang cocok ditempatkan di pantai pulau jawa, dimana memiliki tinggi gelombang didaerah kepulauan jawa mencapai 1 meter sampai 2.5 meter.

Tabel 4.16 Tabel Skala Mekanisme

Skala	Tinggi Gelombang (m)	Panjang pelampung (m)	Panjang Lengan (m)	Daya (watt)
1 : 1	0.10	0.3	0.3	0.00989
1:17	1.7	5.1	5.1	129.97

Dapat terlihat di Tabel 4.16, pada skala 1:17 dengan tinggi gelombang 1.7 meter maka mekanisme ini menghasilkan daya sebesar 12.996 Kw, dengan panjang pelampung 5.1 meter dan panjang lengan 5.1 meter. Dari hasil skala mekanisme dan efisiensi maka dapat dihitung P_{real} yang akan diperoleh pada PLTGL tipe pelampung silinder jika dipasang dilaut lepas.

$$\begin{aligned}P_{real} &= Skala\ model \times \eta_{model} \times P_{in} \\&= 17 \times 12.935 \times 59.1036 \\&= 129.97\ watt\end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan, jika PLTGL ini dipasang dilaut lepas dengan skala 1:17 dan pengaruh efisiensi dari mekanisme maka dapat diperoleh daya maksimal yaitu sebesar 129.97 watt dengan tinggi gelombang 1 meter sampai 2,5 meter.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL Tipe Pelampung Silinder dengan variasi panjang lengan dan panjang pelampung didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai daya listrik meningkat seiring dengan meningkatnya panjang pelampung pada mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder.
2. Nilai daya terbesar ialah pada panjang lengan 30 cm dengan panjang pelampung 30 cm dan frekuensi 3 Hz yaitu sebesar 0.2889 volt, sedangkan daya terkecil pada panjang lengan 50 cm, panjang pelampung 25 cm dan frekuensi 1 Hz sebesar 0.1175 volt.
3. Effisiensi mekanisme terbesar terjadi pada frekuensi 3 Hz panjang lengan 30 cm dan panjang pelampung 30 cm sebesar 15.029%, sedangkan rata-rata error yang terjadi sebesar 5.395%.
4. Besarnya energi listrik yang dihasilkan jika mekanisme PLTGL tipe pelampung silinder dipasang pada laut bebas dengan skala 1:17 sebesar 129.97 watt.

5.2 Saran

Pada penelitian ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mempunyai beberapa saran, yaitu:

1. Kolam simulator yang ada di lab vibrasi masih terjadi gelombang balik, perlu adanya perbaikan untuk menghindari gelombang balik, supaya hasil pengujiannya lebih maksimal.
2. Untuk mengurangi error yang terjadi, perlu dipertimbangkan bagian gesekan yang terjadi pada mekanisme dimasukan pada simulasi.
3. PLTGL tipe pelampung bisa dikembangkan dan diperbaiki lagi dibagian bearing dan generator.

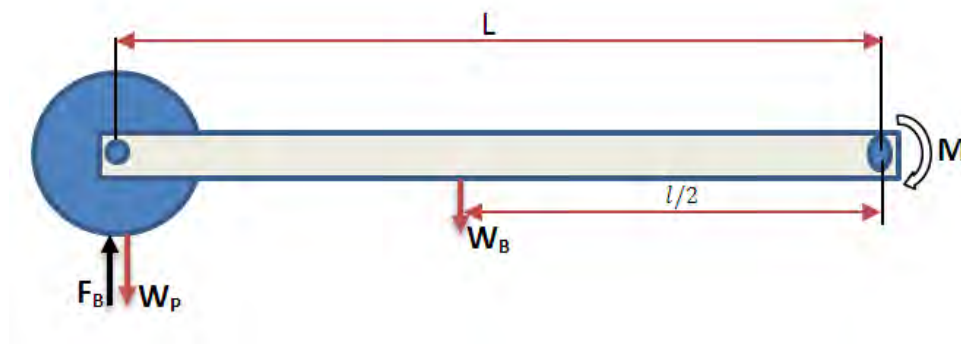
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN 1

1. Analisis Gaya Mekanisme

1.1 Kestimbangan Statis

Kestimbangan statis terjadi diakibatkan oleh mekanisme itu sendiri tanpa di pengaruhi oleh gaya luar. Kestimbangan statis ini hanya diakibatkan oleh berat pelampung, berat batang pengungkit dan gaya apung (*buoyance*) yang terjadi pada pelampung.



Gambar 1 Mekanisme Kestimbangan Statis Posisi Titik Tumpu Pada Sebuah Poros.

Dimana:

W_p = Berat pelampung (N).

W_b = Berat lengan (N).

F_B = Gaya buoyancy (N).

L = Panjang lengan (m).



Gambar 2 *Free Body Diagram* Pada Kestimbangan Statis

Pada kondisi statis pelampung dianggap sebagai benda yang menjadi satu dengan *cantilever*, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 J_p &= m_p \cdot L^2 \\
 J_b &= \frac{1}{3} m_b \cdot L^2 \\
 J_0 &= J_b + J_p \\
 J_0 &= \frac{1}{3} m_b L^2 + m_p L^2 \quad \dots(1.1)
 \end{aligned}$$

Pada hukum newton 2 mengatakan bahwa

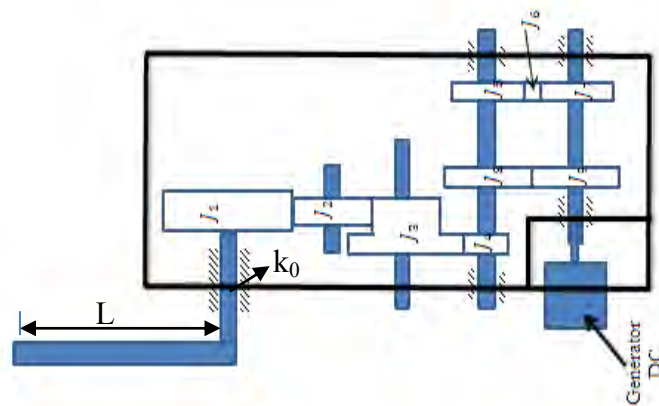
$$\begin{aligned}
 \sum M &= 0 \\
 F_b \cdot l - w_b \cdot \frac{l}{2} - w_p \cdot l &= 0 \\
 F_b \cdot l - w_b \cdot \frac{l}{2} - w_p \cdot l &= 0 \quad \dots(1.2)
 \end{aligned}$$

Pada keseimbangan statis didapatkan rumusan hubungan antara gaya *buoyancy* dan massa pelampung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F_b \cdot l &= w_b \cdot \frac{l}{2} + w_p \cdot l \\
 F_b \cdot l &= m_b \cdot g \cdot \frac{l}{2} + m_p \cdot g \cdot l \\
 F_b &= \frac{1}{l} \left(m_b \cdot g \cdot \frac{l}{2} + m_p \cdot g \cdot l \right) \\
 F_b &= \frac{m_b}{2} \cdot g + m_p \cdot g = \left(\frac{m_b}{2} + m_p \right) g \quad \dots(1.3)
 \end{aligned}$$

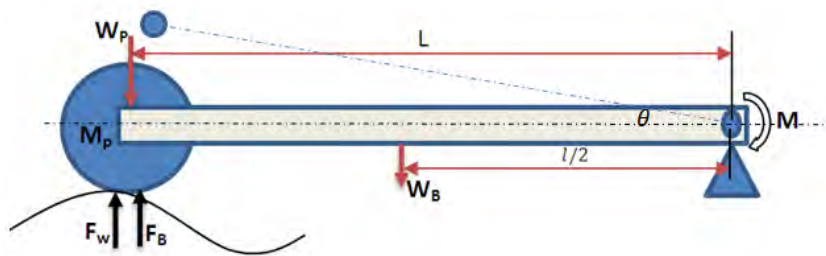
1.2 Kestimbangan Dinamis Lengan

Penyederhanaan model untuk mencari persamaan dinamis pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut tipe pelampung silinder.

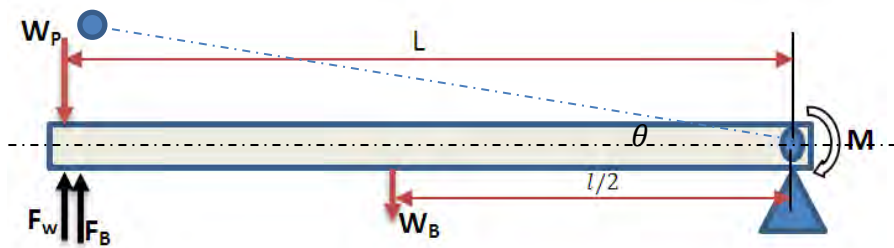


Gambar 3 Penyederhanaan model

Kesetimbangan dinamis terjadi saat ada gelombang yang datang mengenai pelampung sehingga jumlah gaya atau gaya berat yang bekerja pada sistem sama dengan nol. Kesetimbangan dinamis bisa terjadi karena adanya pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada arah vertikal dan arah horizontal yang disebabkan oleh gelombang laut.



Gambar 4 Mekanisme Sistem Dinamis Pada Lengan



Gambar 5 *Free Body* Diagram Kesetimbangan Dinamis Pada Lengan Dan Pelampung

$$\sum M = J_0 \ddot{\theta}$$

$$F_b \cdot l + F_w \cdot l - W_p(l + l \sin \theta) - W_b \left(\frac{l}{2} + \frac{l}{2} \sin \theta \right) - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta} \quad \dots(1.4)$$

Akibat dari kesetimbangan statis yang terjadi pada mekanisme maka persamaan (1.1) disubstitusikan kepersamaan (1.4). Maka menjadi:

$$F_b \cdot l + F_w \cdot l - W_p \cdot l - W_p l \sin \theta - W_b \cdot \frac{l}{2} - W_b \cdot \frac{l}{2} \sin \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta}_0$$

$$F_w \cdot l - W_p l \sin \theta - W_b \cdot \frac{l}{2} \sin \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) = J_0 \ddot{\theta}_0$$

Dimana $\sin \theta = \theta$, maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + (W_p \cdot l + W_b \cdot l/2) \sin \theta + k_0(\theta_0 - \theta_1) = F_w \cdot l$$

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + (W_p \cdot l + W_b \cdot l/2) \sin \theta + k_0 \theta_0 = F_w \cdot l + k_0 \theta_1$$

Dimana J_0 adalah $\frac{1}{3}m_b L^2 + m_p L^2$, maka :

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta + k_0 \theta_0 = F_w \cdot l + k_0 \theta_1$$

$$\ddot{\theta}_0 = \frac{l}{J_0} \left[F_w \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right] \quad \dots(1.5)$$

Dimana gaya wave adalah:

$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \quad \dots(1.6)$$

Substitusikan persamaan (1.1), dan (1.6) kepersamaan (1.5), maka diperoleh:

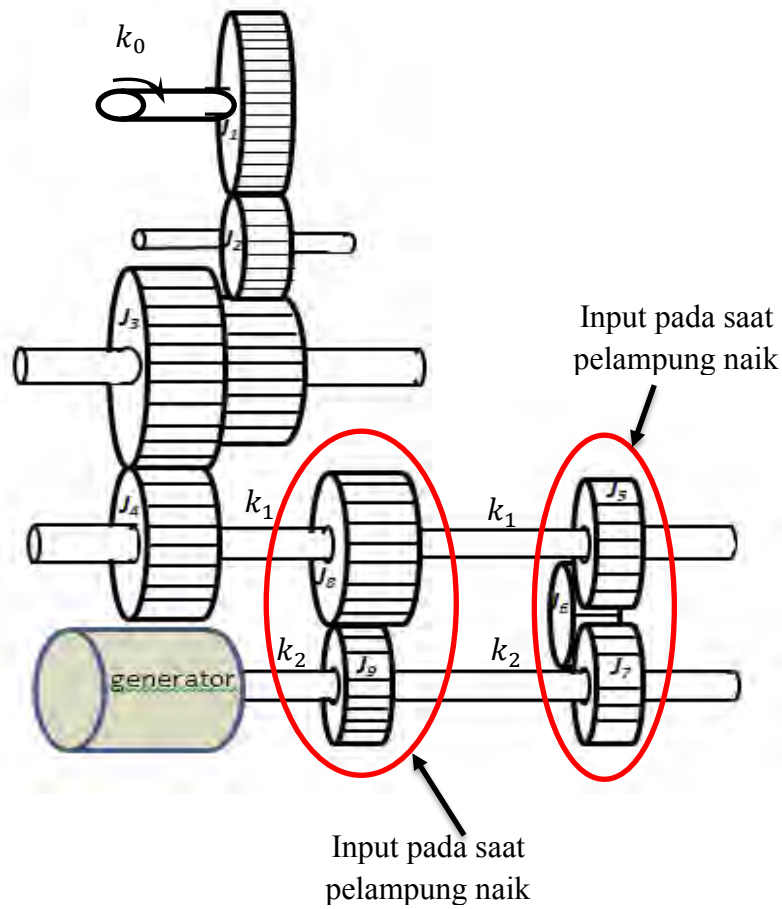
$$\ddot{\theta}_0 = \frac{1}{\frac{1}{3}m_b L^2 + m_p L^2} \left[\frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right]$$

Dimana:

$$\ddot{\theta}_0 = \dot{\omega}_0$$

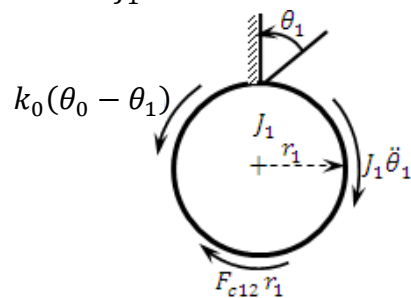
$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{\frac{1}{3}m_b L^2 + m_p L^2} \left[\frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64 \pi \lambda} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2 \cdot l - \left(W_p \cdot l + W_b \cdot \frac{l}{2} \right) \theta - k_0(\theta_0 - \theta_1) \right] \quad \dots(1.7)$$

1.3 Persamaan Dinamis Pada Gearbox



Gambar 6 Mekanisme Gear Box

➤ FBD J_1



Persamaan matematis

$$\sum M = J_1 \ddot{\theta}_1$$

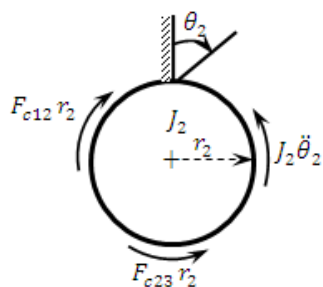
$$J_1 \ddot{\theta}_1 + F_{c12} r_1 = k_0 (\theta_0 - \theta_1)$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + F_{c12} r_1 - k_0 (\theta_0 - \theta_1) = 0$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + F_{c12} r_1 - k_0 \theta_0 + k_0 \theta_1 = 0$$

$$F_{c12} = \frac{1}{r_1} [-J_1 \ddot{\theta}_1 + k_0 \theta_0 - k_0 \theta_1] \quad \dots(1.8)$$

➤ FBD J_2



Persamaan matematis

$$\sum M = J_2 \ddot{\theta}_2$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + F_{c23} r_2 = F_{c12} r_2$$

$$F_{c12} r_2 = J_2 \ddot{\theta}_2 + F_{c23} r_2 \quad \dots(1.9)$$

Substitusikan Persamaan (1.8) kepersamaan (1.9)

$$\frac{1}{r_1} r_2 [-J_1 \ddot{\theta}_1 - k_0 \theta_0 + k_0 \theta_1] = J_2 \ddot{\theta}_2 + F_{c23} r_2$$

Dimana rasio dari roda gigi adalah:

$$r_1 \theta_1 = r_2 \theta_2$$

$$\theta_1 = \frac{r_2}{r_1} \theta_2 \implies \frac{r_2}{r_1} = N_1$$

$$\theta_1 = N_1 \theta_2$$

$$N_1 [-J_1 \ddot{\theta}_1 - k_0 \theta_0 + k_0 \theta_1] = J_2 \ddot{\theta}_2 + F_{c23} r_2$$

$$N_1 [-J_1 N_1 \ddot{\theta}_2 - k_0 \theta_0 + k_0 N_1 \theta_2] = J_2 \ddot{\theta}_2 + F_{c23} r_2$$

$$[-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2] = J_2 \ddot{\theta}_2 + F_{c23} r_2$$

$$[-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - J_2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2] = F_{c23} r_2$$

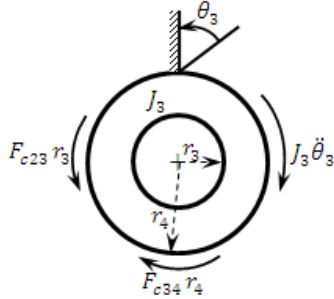
$$F_{c23} r_2 = [-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - J_2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2]$$

$$F_{c23} r_2 = [-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - J_2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2]$$

$$F_{c23} = \frac{1}{r_2} [-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - J_2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2] \quad \dots(1.10)$$

➤ FBD J_3

Persamaan matematis



$$\Sigma M = J_3 \ddot{\theta}_3$$

$$J_3 \ddot{\theta}_3 + F_{c34} r_4 = F_{c23} r_3$$

$$F_{c23} r_3 = J_3 \ddot{\theta}_3 + F_{c34} r_4 \quad \dots(1.11)$$

Substitusikan Persamaan (1.10) kepersamaan (1.11)

$$\frac{1}{r_2} r_3 [-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - J_2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2] = J_3 \ddot{\theta}_3 + F_{c34} r_4$$

Dimana rasio dari roda gigi adalah sebagai berikut:

$$r_2 \theta_2 = r_3 \theta_3$$

$$\theta_2 = \frac{r_3}{r_2} \theta_3 \implies \frac{r_3}{r_2} = N_2$$

$$\theta_2 = N_2 \theta_3$$

$$N_2 [-J_1 N_1^2 \ddot{\theta}_2 - J_2 \ddot{\theta}_2 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 \theta_2] = J_3 \ddot{\theta}_3 + F_{c34} r_4$$

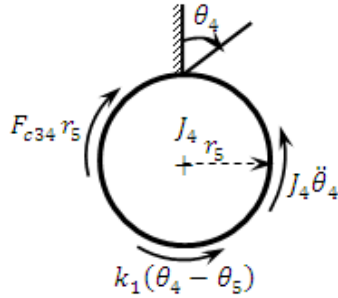
$$N_2 [-J_1 N_1^2 N_2 \ddot{\theta}_3 - J_2 N_2 \ddot{\theta}_3 - k_0 N_1 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2 \theta_3] = J_3 \ddot{\theta}_3 + F_{c34} r_4$$

$$[-J_1 N_1^2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - k_0 N_1 N_2 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2^2 \theta_3] = J_3 \ddot{\theta}_3 + F_{c34} r_4$$

$$F_{c34} = \frac{1}{r_4} [-J_1 N_1^2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_3 \ddot{\theta}_3 - k_0 N_1 N_2 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2^2 \theta_3] \quad \dots(1.12)$$

➤ FBD J_4

Persamaan matematis



$$\Sigma M = J_4 \ddot{\theta}_4$$

$$J_4 \ddot{\theta}_4 + k_1(\theta_4 - \theta_5) = F_{c34} r_5$$

$$F_{c34} r_5 = J_4 \ddot{\theta}_4 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4 \quad \dots(1.13)$$

Substitusikan Persamaan (1.12) kepersamaan (1.13)

$$\frac{1}{r_4} r_5 [-J_1 N_1^2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_3 \ddot{\theta}_3 - k_0 N_1 N_2 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2^2 \theta_3] = J_4 \ddot{\theta}_4 + k \theta_5 - k \theta_4$$

Dimana rasio dari roda gigi adalah sebagai berikut:

$$r_4 \theta_3 = r_5 \theta_4$$

$$\theta_3 = \frac{r_5}{r_4} \theta_4 \implies \frac{r_5}{r_4} = N_3$$

$$\theta_3 = N_3 \theta_4$$

$$N_3 [-J_1 N_1^2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_2 N_2^2 \ddot{\theta}_3 - J_3 \ddot{\theta}_3 - k_0 N_1 N_2 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2^2 \theta_3] = J_4 \ddot{\theta}_4 + k \theta_5 - k \theta_4$$

Dimana $\ddot{\theta}_3 = N_3 \ddot{\theta}_4$ maka:

$$N_3 [-J_1 N_1^2 N_2^2 N_3 \ddot{\theta}_4 - J_2 N_2^2 N_3 \ddot{\theta}_4 - J_3 N_3 \ddot{\theta}_4 - k_0 N_1 N_2 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2^2 N_3 \theta_4] = J_4 \ddot{\theta}_4 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$[-J_1 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \ddot{\theta}_4 - J_2 N_2^2 N_3^2 \ddot{\theta}_4 - J_3 N_3^2 \ddot{\theta}_4 - k_0 N_1 N_2 N_3 \theta_0 + k_0 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \theta_4] = J_4 \ddot{\theta}_4 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$0 = J_1 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \ddot{\theta}_4 + J_2 N_2^2 N_3^2 \ddot{\theta}_4 + J_3 N_3^2 \ddot{\theta}_4 + k_0 N_1 N_2 N_3 \theta_0 - k_0 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \theta_4 + J_4 \ddot{\theta}_4 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$0 = (J_1 N_1^2 N_2^2 N_3^2 + J_2 N_2^2 N_3^2 + J_3 N_3^2 + J_4) \ddot{\theta}_4 + k_0 N_1 N_2 N_3 \theta_0 - k_0 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \theta_4 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$\ddot{\theta}_4 = \frac{1}{(J_1 N_1^2 N_2^2 N_3^2 + J_2 N_2^2 N_3^2 + J_3 N_3^2 + J_4)} [-k_1 \theta_5 + k_1 \theta_4 + k_0 N_1 N_2 N_3 \theta_0 - k_0 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \theta_4]$$

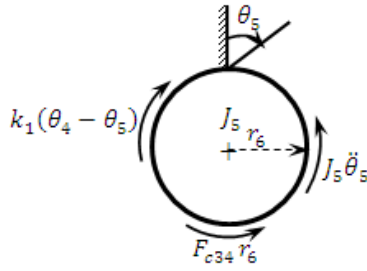
Dimana:

$$\ddot{\theta} = \dot{\omega}$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega}_4 = \frac{1}{(J_1 N_1^2 N_2^2 N_3^2 + J_2 N_2^2 N_3^2 + J_3 N_3^2 + J_4)} [k_1 \theta_4 + k_0 N_1 N_2 N_3 \theta_0 - k_0 N_1^2 N_2^2 N_3^2 \theta_4 - k_1 \theta_5] \quad (1.14)$$

➤ FBD J_5



Persamaan matematis

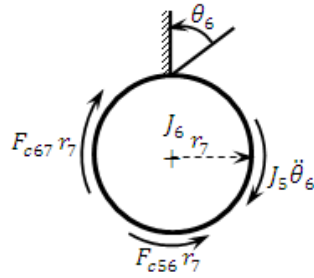
$$\sum M = J_5 \ddot{\theta}_5$$

$$J_5 \ddot{\theta}_5 + F_{c56} r_6 = k_1 (\theta_5 - \theta_4)$$

$$J_5 \ddot{\theta}_5 + F_{c56} r_6 = k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$F_{c56} r_6 = -J_5 \ddot{\theta}_5 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4 \quad \dots(1.15)$$

➤ FBD J_6



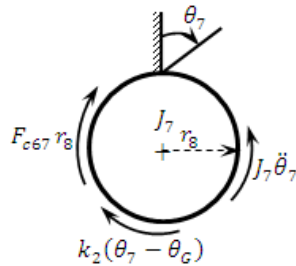
Persamaan matematis

$$\sum M = J_6 \ddot{\theta}_6$$

$$J_6 \ddot{\theta}_6 + F_{c67} r_7 = F_{c56} r_7$$

$$F_{c56} r_7 = -J_6 \ddot{\theta}_6 + F_{c67} r_7 \quad \dots(1.16)$$

➤ FBD J_7



Persamaan matematis

$$\sum M = J_7 \ddot{\theta}_7$$

$$-J_7 \ddot{\theta}_7 + k_2 (\theta_G - \theta_7) = F_{c67} r_8$$

$$F_{c67} r_8 = J_7 \ddot{\theta}_7 - k_2 \theta_G + k_2 \theta_7$$

$$F_{c67} = \frac{1}{r_8} [J_7 \ddot{\theta}_7 - k_2 \theta_G + k_2 \theta_7] \quad \dots(1.17)$$

Substitusikan persamaan (1.17) kepersamaan (1.16).

$$\frac{1}{r_8} r_7 [J_7 \ddot{\theta}_7 - k_2 \theta_G + k_2 \theta_7] = -J_6 \ddot{\theta}_6 + F_{c67} r_7$$

Dimana rasio dari roda gigi adalah sebagai berikut:

$$r_7 \theta_6 = r_8 \theta_7$$

$$\theta_6 = \frac{r_8}{r_7} \theta_7 \implies \frac{r_8}{r_7} = N_4$$

$$\theta_6 = N_4 \theta_7$$

$$\theta_7 = \frac{1}{N_4} \theta_6$$

$$\frac{1}{N_4} \left[J_7 \frac{1}{N_4} \ddot{\theta}_6 + k_2 \frac{1}{N_4} \theta_6 - k_2 \frac{1}{N_4} \theta_G \right] = -J_6 \ddot{\theta}_6 + F_{c56} r_7$$

$$\frac{J_7}{N_4^2} \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G = -J_6 \ddot{\theta}_6 + F_{c56} r_7$$

$$\left(\frac{J_7}{N_4^2} + J_6 \right) \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G = F_{c56} r_7$$

$$F_{c56} r_7 = \left(\frac{J_7}{N_4^2} + J_6 \right) \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G$$

$$F_{c56} = \frac{1}{r_7} \left(\frac{J_7}{N_4^2} + J_6 \right) \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G \quad \dots(1.18)$$

Substitusikan persamaan (1.18) kepersamaan (1.15)

$$\frac{1}{r_7} r_6 \left[\left(\frac{J_7}{N_4^2} + J_6 \right) \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G \right] = -J_5 \ddot{\theta}_5 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

Dimana rasio dari roda gigi adalah sebagai berikut:

$$r_6 \theta_5 = r_7 \theta_6$$

$$\theta_5 = \frac{r_7}{r_6} \theta_6 \implies \frac{r_8}{r_7} = N_5$$

$$\theta_5 = N_5 \theta_6$$

$$\theta_6 = \frac{1}{N_5} \theta_5$$

$$\frac{1}{r_7} r_6 \left[\left(\frac{J_7}{N_4^2} + J_6 \right) \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G \right] = -J_5 \ddot{\theta}_5 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$\frac{1}{N_5} \left[\left(\frac{J_7}{N_4^2} + J_6 \right) \ddot{\theta}_6 + \frac{k_2}{N_4^2} \theta_6 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G \right] = -J_5 \ddot{\theta}_5 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$\frac{1}{N_5} \left[\left(\frac{J_7}{N_4^2 N_5} + \frac{J_6}{N_5} \right) \ddot{\theta}_5 + \frac{k_2}{N_4^2 N_5} \theta_5 - \frac{k_2}{N_4} \theta_G \right] = -J_5 \ddot{\theta}_5 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$\left[\left(\frac{J_7}{N_4^2 N_5} + \frac{J_6}{N_5^2} \right) \ddot{\theta}_5 + \frac{k_2}{N_4^2 N_5} \theta_5 - \frac{k_2}{N_4 N_5} \theta_G \right] = -J_5 \ddot{\theta}_5 + k_1 \theta_5 - k_1 \theta_4$$

$$\left[\left(\frac{J_7}{N_4^2 N_5} + \frac{J_6}{N_5^2} + J_5 \right) \ddot{\theta}_5 + \left(\frac{k_2}{N_4^2 N_5} - k_1 \right) \theta_5 + k_1 \theta_4 - \frac{k_2}{N_4 N_5} \theta_G \right] = 0$$

$$\ddot{\theta}_5 = \left(\frac{1}{\frac{J_7}{N_4^2 N_5^2} + \frac{J_6}{N_5^2} + J_5} \right) \left[k_1 \theta_4 + \left(\frac{k_2}{N_4^2 N_5^2} - k_1 \right) \theta_5 - \frac{k_2}{N_4 N_5} \theta_G \right]$$

Dimana:

$$\ddot{\theta} = \dot{\omega}$$

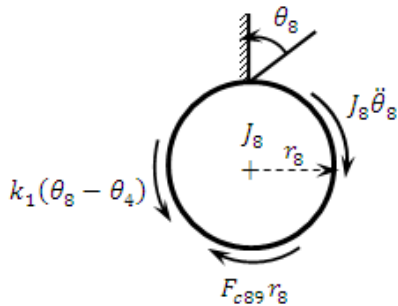
$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega}_5 = \left(\frac{1}{\frac{J_7}{N_4^2 N_5^2} + \frac{J_6}{N_5^2} + J_5} \right) \left[k_1 \theta_4 + \left(\frac{k_2}{N_4^2 N_5^2} - k_1 \right) \theta_5 - \frac{k_2}{N_4 N_5} \theta_G \right] \quad \dots(1.19)$$

1.4 Persamaan dan free body diagram pada saat pelampung bergerak kebawah:

➤ FBD J_8

Persamaan matematis



$$\Sigma M = J_8 \ddot{\theta}_8$$

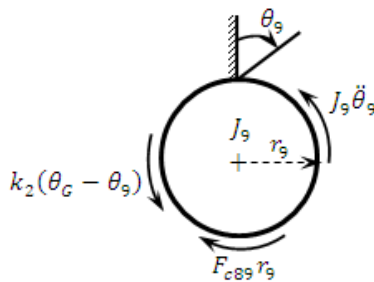
$$J_8 \ddot{\theta}_8 + F_{c89} r_8 - k_1 (\theta_8 - \theta_4) = 0$$

$$J_8 \ddot{\theta}_8 + F_{c89} r_8 - k_1 \theta_8 + k_1 \theta_4 = 0$$

$$F_{c89} = \frac{1}{r_8} [-J_8 \ddot{\theta}_8 + k_1 \theta_8 - k_1 \theta_4] \quad \dots(1.20)$$

➤ FBD J_9

Persamaan matematis



$$\Sigma M = J_9 \ddot{\theta}_9$$

$$J_9 \ddot{\theta}_9 + k_2 (\theta_G - \theta_9) - F_{c89} r_9 = 0$$

$$J_9 \ddot{\theta}_9 + k_2 \theta_G - k_2 \theta_9 = F_{c89} r_9$$

$$F_{c89} r_9 = J_9 \ddot{\theta}_9 + k_2 \theta_G - k_2 \theta_9 \quad \dots(1.21)$$

Substitusikan persamaan (1.21) ke persamaan (1.20).

$$\frac{1}{r_8} r_9 [-J_8 \ddot{\theta}_8 + k_1 \theta_8 - k_1 \theta_4] = J_9 \ddot{\theta}_9 + k_2 \theta_G - k_2 \theta_9$$

Dimana rasio dari roda gigi adalah sebagai berikut:

$$r_8 \theta_8 = r_9 \theta_9$$

$$\theta_8 = \frac{r_8}{r_9} \theta_9 \implies \frac{r_8}{r_9} = N_6$$

$$\theta_8 = N_6 \theta_9$$

$$\begin{aligned}
N_6[-J_8\ddot{\theta}_8 + k_1\theta_8 - k_1\theta_4] &= J_9\ddot{\theta}_9 + k_2\theta_G - k_2\theta_9 \\
N_6[-J_8N_6\ddot{\theta}_9 + k_1N_6\theta_9 - k_1\theta_4] &= J_9\ddot{\theta}_9 + k_2\theta_G - k_2\theta_9 \\
0 &= J_9\ddot{\theta}_9 + J_8N_6^2\ddot{\theta}_9 - k_1N_6^2\theta_9 + k_2\theta_G - k_2\theta_9 + k_1\theta_4 \\
\ddot{\theta}_9 &= \frac{1}{J_8N_6^2 + J_9} [k_1\theta_4 + (k_1N_6^2 - k_2)\theta_9 - k_2\theta_G]
\end{aligned}$$

Dimana:

$$\ddot{\theta} = \dot{\omega}$$

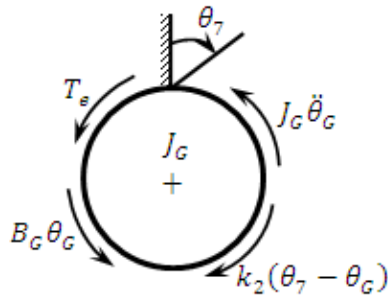
$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega}_9 = \frac{1}{J_8N_6^2 + J_9} [k_1\theta_4 + (k_1N_6^2 - k_2)\theta_9 - k_2\theta_G] \quad \dots(1.21)$$

1.5 Persamaan Dinamis Pada Generator

Generator merupakan instrumen pembangkit tenaga listrik yang mengubah energi mekanis sebagai masukan menjadi energi listrik sebagai keluaran dimana kecepatan putar dari rotornya sama dengan kecepatan putar dari statornya.

➤ FBD Mekanik generator Persamaan matematis



$$\begin{aligned}
\Sigma M &= J_G \ddot{\theta}_G \\
J_G \ddot{\theta}_G + B_G \dot{\theta}_G + T_e - k_2(\theta_7 - \theta_G) &= 0 \\
J_G \ddot{\theta}_G + B_G \dot{\theta}_G + T_e + k_2\theta_7 - k_2\theta_G &= 0 \\
\dot{\theta}_G &= \frac{1}{J_G} [-B_G \dot{\theta}_G - T_e - k_2\theta_G + k_2\theta_7] \quad \dots(1.22)
\end{aligned}$$

➤ FBD mekanik generator

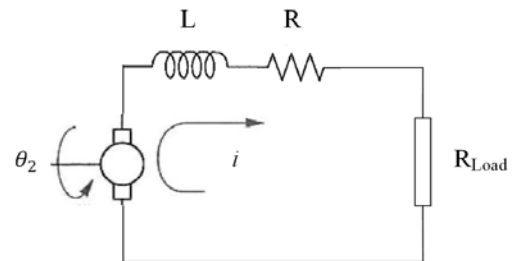
Torsi generator $T_e = (2 \cdot N \cdot B \cdot l \cdot r) i$

Asumsi polaritas em

$$e_m = e(t) = (2 \cdot N \cdot B \cdot l \cdot r) \dot{\theta}$$

$$L \frac{di}{dt} + R_i + R_{load} i = 2 \cdot N \cdot B \cdot l \cdot r = e(t)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [-R_i + (2 \cdot N \cdot B \cdot l \cdot r) \dot{\theta}] \quad \dots(1.23)$$

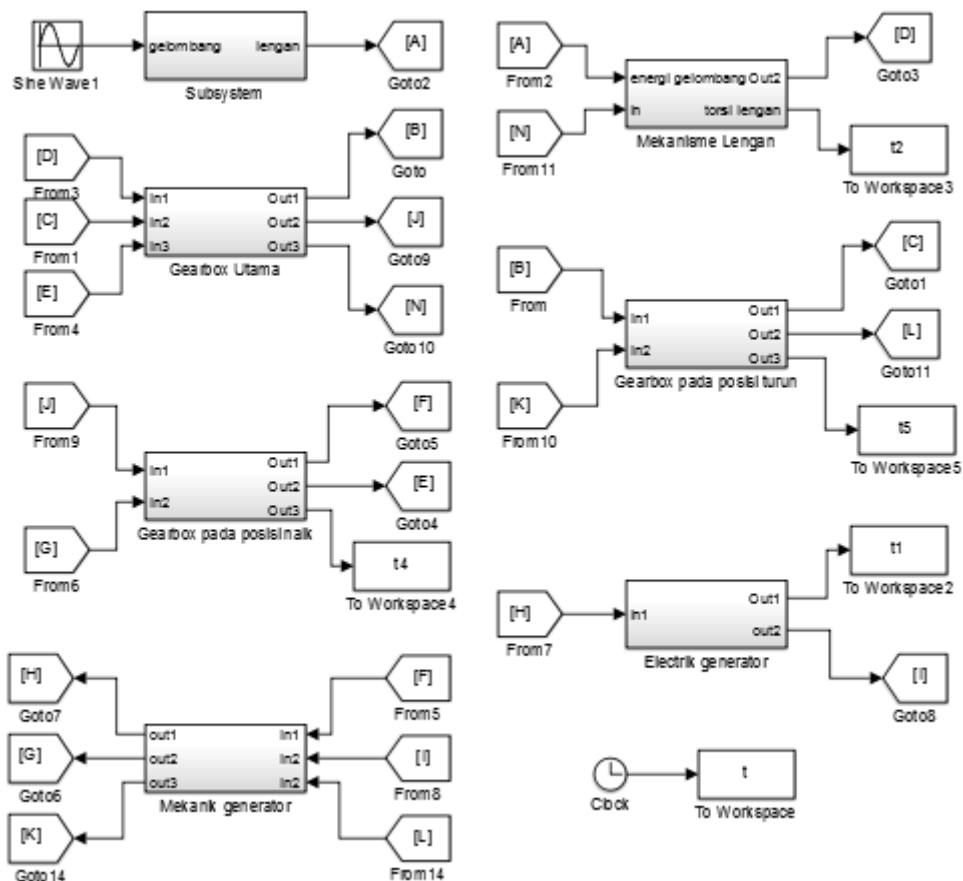


Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN 2

2.1 Block Simulink Secara Menyeluruh

Setelah selesai melakukan pembuatan persamaan matematis maka hasil dari persamaan matematis dibuat state variable, dari persamaan tersebut dibuat block simulasi pada Simulink matlab. Hasil block simulasi ditampilkan pada gambar 2.1 berikut ini:

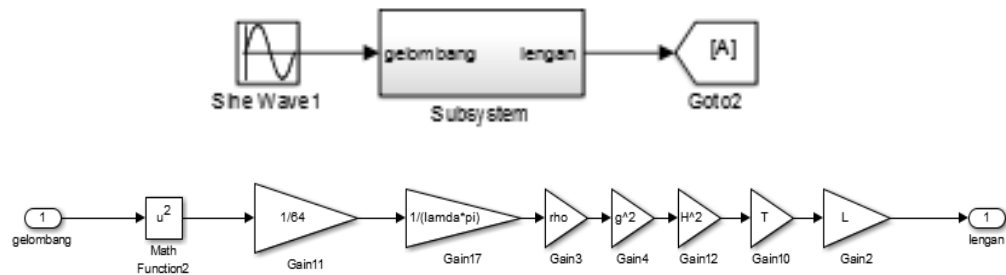


Gambar 2.1 Gambar block simulasi secara global

Dari beberapa bagian dari block simulasi terbagi dalam beberapa bagian subsitem seperti pada gambar 2.2 berikut ini:

1. Blok simulasi gelombang laut.

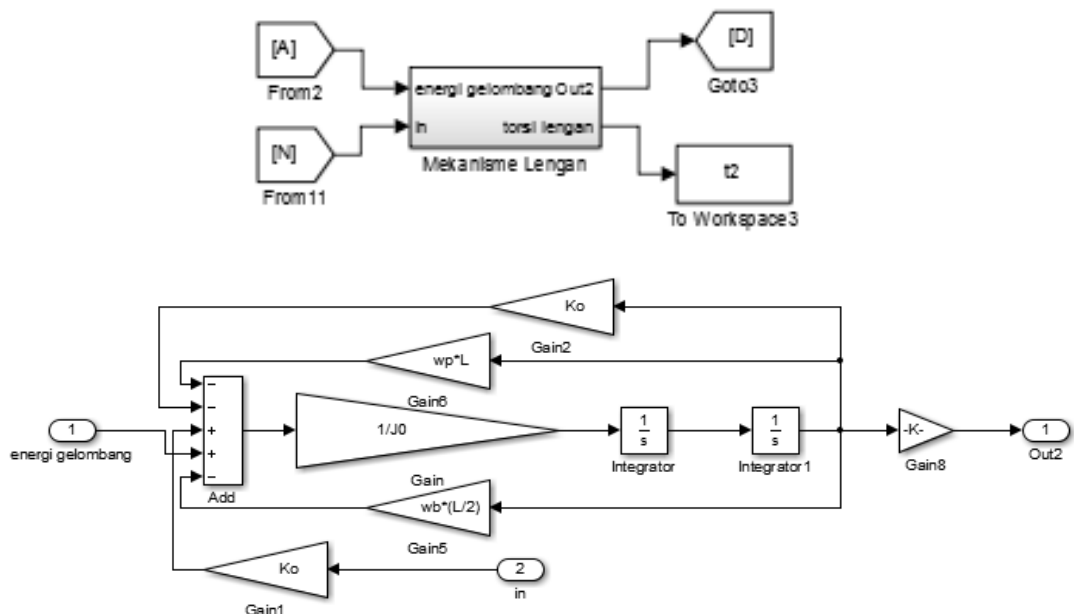
Dari subsistem mekanisme gelombang laut, jika dijabarkan menghasilkan block simulasi seperti pada gambar 2.2 berikut ini, pada block simulasi ini disusun berdasar persamaan matematis yang dibuat, dari persamaan tersebut digunakan untuk mencari inputan gelombang pada kolam simulator.



Gambar 2.2 Gambar block simulasi pada sistem gelombang.

2. Block simulasi pada mekanisme lengan

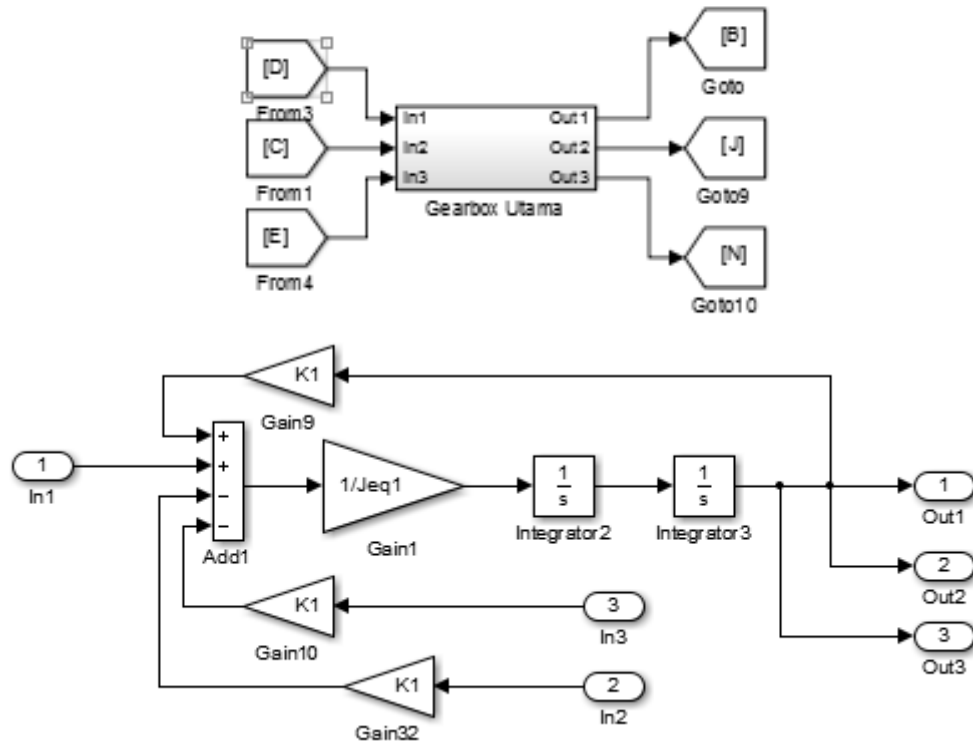
Pada subsistem dari mekanis gelombang ini terdiri dari beberapa bagian persamaan matematis, persamaan matematis tersebut ditampilkan pada gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3 Gambar block simulasi pada sistem lengan pengungkit

3. Block simulasi pada gearbox

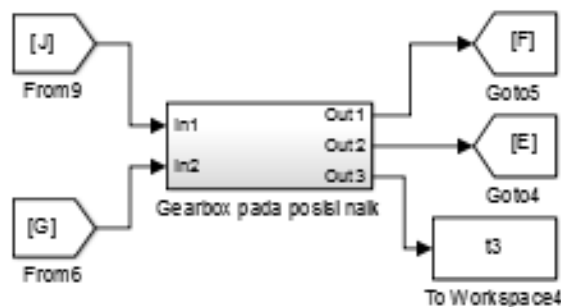
Dari block simulasi pada gambar 2.4 merupakan gabungan beberapa persamaan matematis yang dijadikan satu subsistem untuk mempersingkat block simulasi, hasil dari subsistem tersebut ditampilkan pada gambar 2.4 berikut ini:

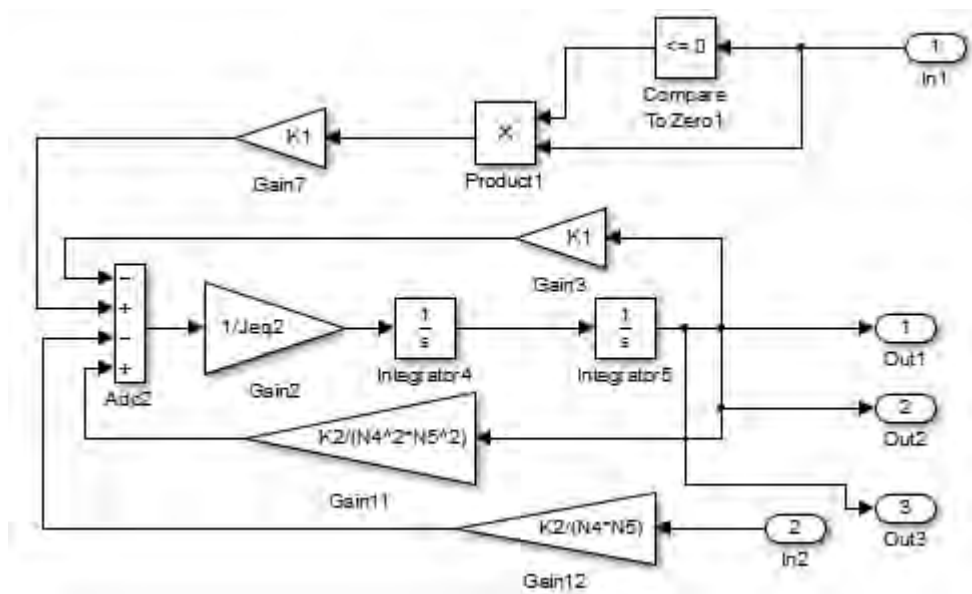


Gambar 2.4 Gambar block simulasi pada sistem gearbox utama

4. Block simulasi pada posisi naik

Pada gear box terbagi dalam beberapa bagian, pada saat pelampung bergerak keatas dipisah dengan gearbox saat bergerak kebawah, block simulasi ditampilkan pada gambar 2.5 berikut ini, dari subsistem tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut.

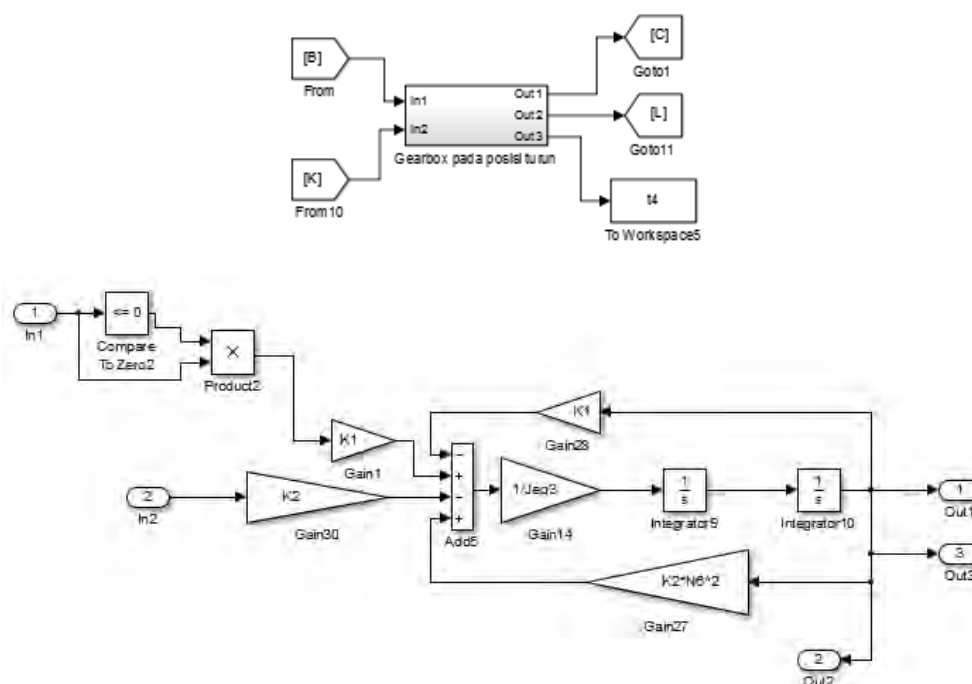




Gambar 2.5 Gambar block simulasi pada sistem gearbox pada saat gerakan keatas

5. Block simulasi gearbox pada posisi turun

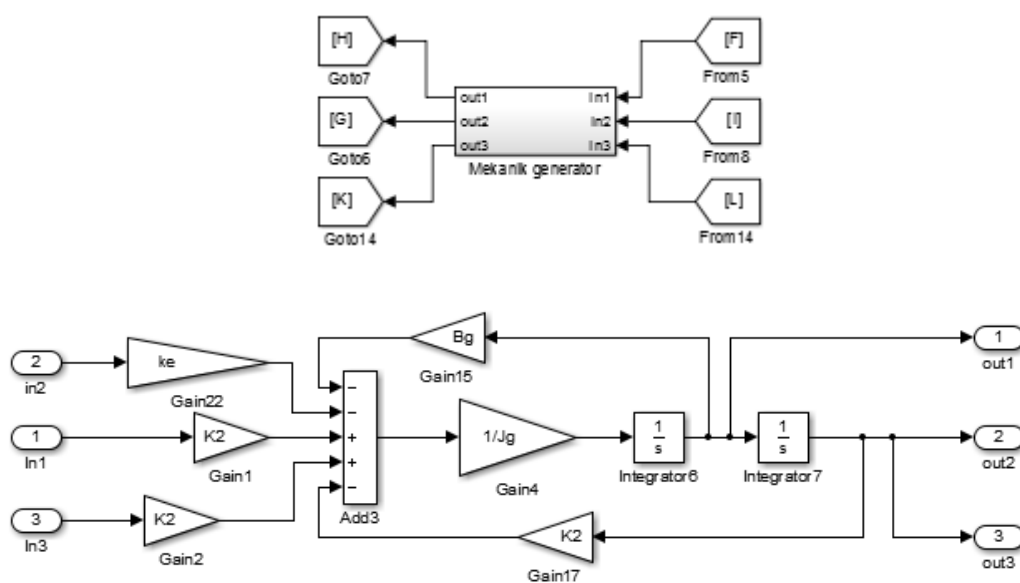
Dari gambar 2.6 terdiri dari beberapa persamaan matematis yang dijadikan didalam satu subsistem untuk mempersingkat block simulasi, dari block diagram tersebut dapat dijabarkan seperti pada gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Gambar block simulasi pada sistem gearbox pada saat gerakan kebawah

6. Block simulasi pada mekanik rotary generator

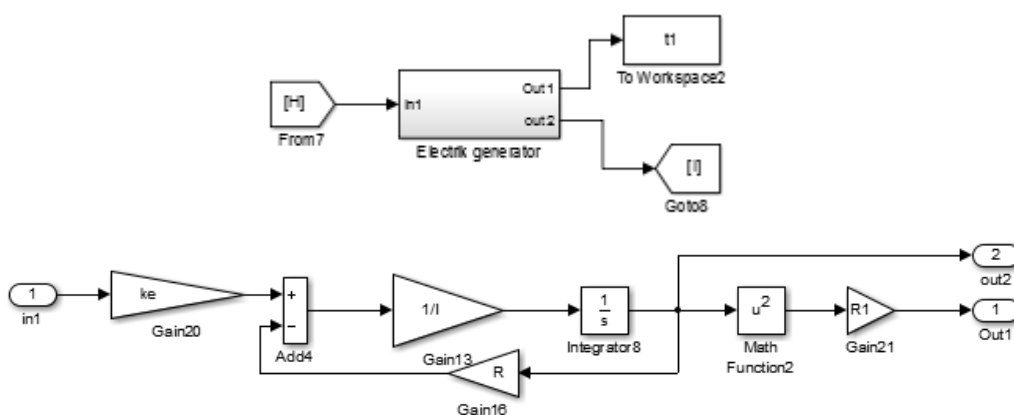
Beberapa persamaan dari mekanik generator ditampilkan pada gambar 2.7 berikut ini, pada bagian ini terdiri dari beberapa sistem yang akan disusun dalam satu block simulasi supaya dapat dihubungkan keblock elektrik pada rotary generator.



Gambar 2.7 Gambar block simulasi pada sistem mekanik rotary generator

7. Block simulasi pada elektrik generator

Block simulasi pada elektrik generator dibuat dalam bentuk subsistem, seperti yang ditampilkan pada gambar 2.8 berikut ini, dari subsistem tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut.



Gambar 2.8 Gambar block simulasi pada sistem elektrik rotary generator

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Leijon, H. Bernhoff, O. Agren, J. Isberg, J. Sundberg, M. Berg, K. E. Karlsson, and A. Wolfbrandt, "Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator," *Energy Convers. IEEE Trans. On*, vol. 20, no. 1, pp. 219–224, 2005.
- [2] S. Hadi, "Energi listrik alternatif berbasis arus laut Indonesia," Institut Teknologi Bandung, 2014.
- [3] Masjono, "Desain dan simulasi konverter energi gelombang laut sebagai pembangkit tenaga listrik," *J. Ilmiah Elite Elek.*, vol. 3, no. 2, pp. 113–118, September 2012.
- [4] Y. Yusnitasari, "Studi eksperimen dan analisa energi listrik yang dihasilkan mekanisme pltgl metode pelampung apung dengan variasi pembebanan dan panjang lengan," *Skripsi S.T.*, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya, 2014.
- [5] O. Langhamer, K. Haikonen, and J. Sundberg, "Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 1329–1335, Mei 2010.
- [6] W. Li, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "Application of linear magnetic gears for pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting," *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 47, no. 10, pp. 2624–2627, 2011.
- [7] M. Kramer, L. Marquis, and P. Frigaard, "Performance evaluation of the wavestar prototype," in *The 9th European Wave and Tidal Energy Conference: EWTEC 2011*, 2011.
- [8] K. S. Lok, T. J. Stallard, P. K. Stansby, and N. Jenkins, "Optimisation of a clutch-rectified power take off system for a heaving wave energy device in irregular waves with experimental comparison," *Int. J. Mar. Energy*, vol. 8, pp. 1–16, Desember 2014.
- [9] K. Rhinefrank, E. B. Agamloh, A. von Jouanne, A. K. Wallace, J. Prudell, K. Kimble, J. Aills, E. Schmidt, P. Chan, B. Sweeny, and others, "Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 9, pp. 1279–1298, 2006.
- [10] A. Wijaya and I. Wayan, "Pembangkit listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan Teknologi Oscilating Water Column di Perairan Bali," *J. Teknol. Elektro*, vol. 9, no. 2, 2012.
- [11] M. A. Djabbar and others, "OMBAK SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK," *Pros. Has. Penelit. Fak. Tek.*, vol. 5, no. 1, 2011.
- [12] D. Magagna, "Oscillating water column wave pump: a wave energy converter for water delivery," University of Southampton, 2011.
- [13] A. Muetze and J. Vining, "Ocean Wave Energy Conversion," *Univ. Wis. Madison*, 2005.
- [14] M. E. McCormick, "Ocean Engineering Mechanics," Cambridge University Press, 2010.

- [15] S. S. Rao, –Mechanical Vibrations Fifth Edition,” Prentice Hall, 2011.
- [16] B. Setyana, –Buku Ajar Kuliah Elemen Mesin II, Perancangan Roda Gigi Metode Niemann,” Universitas Diponegoro Semarang, 2007.
- [17] C. M. Close, D. K. Frederick and J. C. Newell, –Modeling and Analysis of Dynamic Systems Third Edition,” John Wiley and Sons, Inc., 2002.
- [18] A. Nurhadi, T. Sukmadi, and K. KARNOTO, –Perancangan Generator Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Fe Fluks Aksial,” Diponegoro University, 2012.
- [19] T. B. Karyasa, –Dasar-dasar Getaran Mekanis,” ANDI Yogyakarta, 2011.
- [20] http://id.wikipedia.org/wiki/Gaya_apung, di akses April 2015.
- [21] <http://www.pancadesain.com/desai-mesin-industri/gear-box>, di akses April 2015.
- [22] <http://arifkristanta.wordpress.com/belajar-online/getaran>, di akses April 2015.
- [23] A. P. Maris, –Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe Pengungkit Dengan Variasi Titik Tumpu Lengan Pengungkit dan Massa Pelampung,” ITS, 2015.

BIOGRAFI PENULIS



I Made Susanto, lahir di Sebam, 15 Maret 1983. Memulai pendidikan formal di SDN 1 Sungai Loban, melanjutkan ke SLTPN 1 Sungai Loban, dan menamatkan sekolah di SMK Kodeco Batulicin pada tahun 2002. Kemudian pada tahun 2003 melanjutkan studi D3 di Politeknik Negeri Banjarmasin dan menamatkan pendidikan pada jurusan teknik mesin pada tahun 2006.

Pada tahun 2010, telah menamatkan pendidikan S1 di Fakultas Teknik-Universitas Islam Kalimantan Muh. Arsyad Al Banjary Banjarmasin. Pada tahun 2012, penulis menerima beasiswa dari Dikti untuk program Pra S2 Saintek di jurusan fisika, FMIPA-ITS Surabaya (2012-2013). Selepas itu penulis melanjutkan studi S2 di jurusan teknik mesin FTI-ITS melalui beasiswa BPPDN 2013. Pada tahun 2016, menamatkan pendidikan Program Pascasarjana Prodi S2 Teknik Mesin FTI-ITS dengan bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal. Untuk memudahkan kritik dan saran yang membangun dapat mengirim ke alamat email susanto.imade@yahoo.co.id.